



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título

Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones.

Autor/es

ADRIAN CABELLO HERCE

Director/es

CARMELO ARTURO JUÁREZ CASTELLÓ

Facultad

Facultad de Ciencias Empresariales

Titulación

Grado en Administración y Dirección de Empresas

Departamento

ECONOMÍA Y EMPRESA

Curso académico

2016-17



Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones., de ADRIAN CABELLO
HERCE

(publicada por la Universidad de La Rioja) se difunde bajo una Licencia Creative
Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported.
Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los
titulares del copyright.



FACULTAD DE CIENCIAS EMPRESARIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones.

Autor: D. Adrián Cabello Herce.

Tutor/es: Prof. D. Carmelo Juárez Castelló.

CURSO ACADÉMICO 2016-2017

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.....	2
2. TÉCNICAS UNICRITERIO Y MULTICRITERIO: ORIGEN, ALCANCE, DIFERENCIAS, VENTAJAS Y DESVENTAJAS.	3
3. TÉCNICAS MULTICRITERIO DISCRETAS.	4
3.1. MÉTODOS DE SUPERACIÓN: MÉTODO ELECTRE.	5
3.2. MÉTODO DE LAS JERARQUÍAS ANALÍTICAS.	8
3.3. MÉTODO AXIOMÁTICO DE ARROW-RAYNAUD.....	11
3.4. EL PROBLEMA DE LOS MÉTODOS DISCRETOS.....	12
4. TÉCNICAS MULTICRITERIO CONTINUAS.....	12
4.1 MATRIZ DE PAGOS.	13
4.2 TÉCNICAS GENERADORAS DEL CONJUNTO EFICIENTE.	14
4.2.1. <i>Método de las Ponderaciones.</i>	15
4.2.2. <i>Método de las ε - restricciones.</i>	16
4.2.3. <i>Simplex Multicriterio.</i>	16
4.3 TÉCNICAS CON INFORMACIÓN A PRIORI.	18
4.3.1. <i>Programación por compromiso.</i>	18
4.3.2 <i>Programación por metas.</i>	20
4.3.2.1 Programación por metas ponderadas.	21
4.3.2.2 Programación por metas lexicográficas.	21
5. APLICACIONES PRÁCTICAS DE LAS TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.....	22
5.1 LA SELECCIÓN DE CARTERAS.....	23
5.2 LA LICITACIÓN PÚBLICA.	24
5.3 DETERMINACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y VALORACIÓN DE ACTIVOS MEDIOAMBIENTALES.	26
5.4 REEMPLAZAMIENTO DE EQUIPOS INDUSTRIALES.	28
5.5 LA SELECCIÓN DE PROVEEDORES.....	30
5.6 OTRAS APLICACIONES.	31
6. CONCLUSIONES.	33
BIBLIOGRAFÍA	34

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1:	Matriz decisional.	5
Figura 2:	Representación gráfica de un pseudocriterio.	6
Figura 3:	Matriz decisional método ELECTRE IS.	7
Figura 4:	Matrices de concordancia y discordancia.	7
Figura 5:	Matriz de superación.	8
Figura 6:	Grafo de superación del método Electre IS.	8
Figura 7:	Arbol de Jerarquías.	9
Tabla 1:	Escala de Saaty	10
Figura 8:	Matriz de comparaciones por pares. Requerimientos necesarios para la determinación del diseño conceptual de un buque LCU.	10
Figura 9:	Matriz de clasificación.	12
Figura 10:	Matriz de clasificación tras eliminar alternativas a y c.	12
Figura 11:	Matriz de pagos.	13
Figura 12:	Inecuaciones modeladas mediante programación lineal y transformadas en ecuaciones.	17
Figura 13:	Representación gráfica del Modelo Simplex.	17
Figura 14:	Interpretación geométrica de las distancias Manhattan (L1), Euclídea (L2) y de Tchebyeff (L ∞).	19

RESUMEN

El presente trabajo hace referencia a las diferentes técnicas multicriterio de ayuda a la decisión desarrolladas hasta el momento. Estas herramientas han surgido durante las últimas décadas con el fin de hacer frente a la necesidad de agilizar y mejorar el proceso de Toma de Decisiones en las empresas e instituciones, debido principalmente, a un entorno cada vez más dinámico y competitivo que obliga a tomar con agilidad decisiones basadas en múltiples criterios y caracterizadas por su complejidad y diversidad de alternativas.

En este contexto, se ofrece una visión general de dichas técnicas. Apoyándose en una taxonomía clara, se describe cada una de las tipologías que la forman, así como las técnicas pertenecientes a cada tipología. Para ello, se incluyen aspectos como su historia, características, funcionamiento, ventajas y limitaciones.

Desde un punto de vista más práctico, con el fin de mostrar su utilidad en el entorno económico-empresarial, se desarrollan varias aplicaciones en diferentes ámbitos, como el de la licitación pública, la valoración de activos ambientales, la selección de proveedores, el reemplazamiento de equipos industriales o la selección de carteras de inversión y se recoge una gran variedad de ejemplos en los que estas técnicas se aplican a casos concretos.

ABSTRACT

The following study deals with the different multi-criteria techniques of decision support which have being developed so far. These tools have emerged during the last decades in order to face the need to streamline and enhance the decision-making process in both companies and institutions. This appearance has happened because an increasingly dynamic and competitive environment compels the agile taking of decisions based on multiple criteria and characterized by their complexity and diversity of alternatives.

In this vein, an overview of technical criteria is provided. On the basis of an apparent taxonomy, it describes each of the typologies that composes it, as well as the techniques that belong to to every typology. Therefore, it also takes into account several issues, such as its history, characteristics, performance, advantages and limitations.

From a more practical viewpoint, so as to show its usefulness in the economic-business environment, several applications are evolving in different areas, such as public bidding, valuation of environmental assets, selection of suppliers, replacement of industrial equipment, or selection of investment portfolios. In addition, a great deal of instances in which these techniques apply to specific cases are recognized.

1. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.

Tanto los animales como los seres humanos tenemos algo en común, en mayor o menor medida, poseemos cierta capacidad de decisión que condiciona la forma en la que actuamos a la hora de hacer frente a diversas situaciones. No obstante, lo que nos diferencia a unos de otros, es la complejidad con la que planteamos y evaluamos los problemas. Mientras que los animales deciden de una forma más simple e instintiva, los seres humanos unas veces generamos decisiones mediante un proceso simple y otras veces, el proceso goza de notable complejidad, principalmente cuando las decisiones marcan momentos importantes en nuestra vida. No es lo mismo decidir el color de la camiseta que comprar, que determinar el grado académico que uno va a cursar.

En el entorno económico y empresarial ocurre lo mismo, las organizaciones, a través de sus directivos, se ven obligadas constantemente a tomar decisiones para hacer frente al conjunto de problemas y oportunidades que presenta el entorno. Durante las últimas décadas debido a la globalización, el desarrollo tecnológico y la gran difusión de la información, el valor para las empresas de poseer un centro de decisiones ágil y eficaz ha aumentado considerablemente. Si el centro decisorio no elige la forma correcta de actuación, puede exponer a la empresa al fracaso, por el contrario, si es capaz de tomar las decisiones adecuadas y ser flexible y adaptativo al mismo tiempo, la empresa podría garantizar su supervivencia, obteniendo ventajas competitivas sostenibles y activos difíciles de imitar por sus competidores.

Según Sáez, García y Rojo (2012) hasta hace unos pocos años el entorno reinante posibilitaba que las empresas pudieran triunfar con estrategias poco dinámicas, y con modelos de gestión basados en la continuidad y hasta cierto punto, en la tradición. La competencia no era agresiva y las ventajas competitivas se mantenían en el tiempo sin apenas dificultad. El cambio en el entorno no estaba previsto, no se aceptaba y tampoco se controlaba.

Sin embargo, en la actualidad las cosas han cambiado. El entorno se ha ido acelerando progresivamente como respuesta a la necesidad de adaptación continua, en un ámbito extremadamente dinámico y competitivo, donde el cambio es el factor esencial, los problemas que se presentan se caracterizan por su complejidad.

Nos encontramos, cada vez más, ante un mercado agresivo y creciente, en este contexto, las técnicas de decisión multicriterio según Romero (1999) constituyen un instrumento racional y objetivo tanto para mejorar la comprensión de los procesos de decisión que subyacen a los procesos sistémicos, como para ayudar a los centros decisores a abordar la necesaria comparación entre alternativas.

Con el objetivo de profundizar en este conjunto de técnicas, a lo largo de este trabajo se recoge, en primer lugar, un apartado con conceptos básicos de dichas técnicas y la explicación de varios de estos métodos de decisión pretendiendo mostrar su funcionamiento. Y en segundo lugar, se hace alusión a la utilidad de estas técnicas en diferentes ámbitos del contexto económico y empresarial como el reemplazamiento del equipo industrial o la selección de inversiones.

En conclusión, el principal objetivo de este trabajo se orienta a ofrecer al lector una visión general y práctica de este conjunto de técnicas con el fin de mostrar su utilidad e importancia en el proceso de Toma de Decisiones empresarial.

2. TÉCNICAS UNICRITERIO Y MULTICRITERIO: ORIGEN, ALCANCE, DIFERENCIAS, VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Como se ha comentado anteriormente, tanto las empresas como los seres humanos, debemos actuar constantemente frente a una gran cantidad de problemas o sucesos tomando decisiones que nos permitan maximizar nuestra satisfacción. Según Romero (1992) tradicionalmente todo proceso de decisión tiene su inicio en la identificación de un problema y el establecimiento de las posibles soluciones para el mismo. Tras ello, estas soluciones se ordenan en función de su deseabilidad para el decisor. Utilizando un criterio como referencia, se desarrollan técnicas matemáticas que permiten identificar la solución óptima mediante la optimización de una función objetivo.

Dicha estructura de decisión goza de consistencia desde un punto de vista lógico, no obstante, a la hora de aplicar este tipo de configuración a la práctica, presenta considerables desviaciones respecto a los procesos reales de toma de decisiones. Esto se debe a que los centros de decisión optan por ordenar las soluciones en función de múltiples criterios que reflejan sus particulares preferencias en detrimento del uso de un único criterio.

Los orígenes de este tipo de técnicas se remontan al siglo XX. Pese a la masiva utilización de los métodos de decisión unicriterio durante las primeras décadas, a partir de los años 50 comenzaron a desarrollarse estudios que trataban el enfoque multicriterio, como los de Koopmans (1951) en los cuales se desarrolla el concepto de vector eficiente o los de Kuhn y Tucker (1951) en los que se asientan las bases de la “revolución multicriterio”.

Asimismo, otros autores se centraron en enunciar los principios de la programación por metas, entre ellos destacan Cooper y Ferguson (1955), quienes desarrollaron posteriormente dichos principios en *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming* [Cooper y Ferguson (1961)]

Milton Friedman (1962) en su texto *Teoría de los precios* explica que existen dos tipos de problemas, los tecnológicos, caracterizados por contener únicamente un criterio y los económicos, caracterizados por la existencia de múltiples criterios. Zeleny (1982) añade que los problemas tecnológicos implican únicamente dificultades de medición y de búsqueda. Por el contrario, los problemas económicos o reales requieren una toma de decisión debido a que se utilizan varios criterios. No es lo mismo elegir la botella de vino más barata, que elegir la botella óptima en cuanto a menor precio, mayor graduación y edad del vino o crianza. En el primer caso, el problema se puede solucionar buscando información acerca de los precios de las diferentes botellas, la decisión queda determinada de una forma simple. En el segundo caso, la complejidad de obtener un resultado óptimo es mayor, ya que entran en conflicto diferentes objetivos. En éste caso, la decisión queda determinada por la importancia que atribuye el consumidor a cada uno de los criterios utilizados.

En 1972 se celebró la primera *Conferencia Mundial sobre Toma de Decisiones Multicriterio* que ha derivado en lo que ahora se denomina *Sociedad Internacional de Toma de Decisiones*. “Este acontecimiento supuso el origen de una institución encargada del estudio de este tipo de técnicas de una forma organizada y normalizada” [Romero (1993)]. Consecuentemente, a partir de la década de 1970, se produjo un incremento considerable en la publicación de artículos científicos relacionados con esta materia en

gran cantidad de prestigiosas revistas, como, por ejemplo, *European Journal of Operational Research*. Además, se creó el *Journal of Multi Criteria Decision Analysis*, una revista dedicada especialmente a este ámbito.

Durante estas últimas décadas, las técnicas multicriterio han proliferado y se han adaptado a diferentes ámbitos de actuación como, por ejemplo, la integración de parámetros socioeconómicos en estudios espaciales de riesgo sanitario [Peluso, Usunoff y Entraigas (2003)], el de la inversión empresarial en la cartera de negocios, [Padilla y Guerrero (2005)], o el de la valoración y gestión de los recursos medioambientales [Blandón (2012)], con el fin de prestar ayuda al decisor a la hora de determinar la solución óptima para cada problema.

Según Vitoriano (2007) desde una perspectiva global, las diferentes técnicas multicriterio se pueden clasificar en función del conjunto de alternativas que considera el decisor a la hora de buscar una solución óptima. Por una parte, si el decisor considera un número infinito de alternativas, el método multicriterio tendrá un carácter continuo. Por otra, si el decisor acepta un conjunto de alternativas finito, el método de decisión tendrá un carácter discreto. Asimismo, teniendo en cuenta un número infinito de alternativas, se puede realizar una distinción entre técnicas generadoras del conjunto eficiente, las cuales no necesitan un intercambio de información previo con el decisor y técnicas que utilizan información a priori.

3. TÉCNICAS MULTICRITERIO DISCRETAS.

En referencia a los **métodos multicriterio discretos**, es necesario introducir una serie de conceptos que permitirán una mejor comprensión de los mismos. En primer lugar, es preciso destacar que las diferentes alternativas del decisor se representan mediante un conjunto de m puntos ($E_1, E_2, \dots E_m$). En segundo lugar, los atributos o criterios que el decisor tiene en cuenta a la hora de elegir una alternativa u otra se representan mediante un conjunto de n puntos ($A_1, A_2 \dots A_n$). Por último, el conjunto de alternativas y criterios se agrupan en una matriz de $m \times n$ ($R_{11}, \dots R_{mn}$) que representa el resultado alcanzado por cada alternativa en relación con cada criterio. Esta matriz se denomina “Matriz decisional” y es el punto de partida de todos los análisis multicriterio discretos.

Este proceso se puede esquematizar mediante las *Funciones de utilidad con atributos múltiples* [Keenei y Raiffa (1976)] de tal forma que el centro decisor le asigna a cada atributo una función de utilidad $u(E)$, y a partir de éstas se desarrolla una función de utilidad multiatributo $u[u_1(E), u_2(E) \dots u_n(E)]$. La función $u(E)$ se asocia a un número real que muestra la utilidad que proporciona cada alternativa considerada y permite compararlas y ordenarlas en función de su preferencia.

Este enfoque guarda consistencia en el ámbito teórico, no obstante, desde el punto de vista práctico presenta importantes límites debido a la dificultad de contraste de un conjunto de supuestos complejos. Según Romero (1993), cuando la estructura del conjunto de restricciones tiene cierta complejidad, el enfoque multiatributo se vuelve inoperante. Este tipo de enfoque presenta utilidad en contextos decisionales en los que el número de alternativas factibles es muy reducido.

Figura 1: Matriz decisional.

		ATRIBUTOS					
		A_1	A_2	.	A_i	.	A_N
ALTERNATIVAS	E_1	R_{11}	R_{12}	.	R_{1i}	.	R_{1n}
	E_2	R_{21}	R_{22}	.	R_{2i}	.	R_{2n}
	E_3	R_{31}	R_{32}	.	R_{3i}	.	R_{3n}

	E_j	R_{j1}	R_{j2}	.	R_{ji}	.	R_{jn}

	E_m	R_{m1}	R_{m2}	.	R_{mi}	.	R_{mn}

Fuente: Elaboración propia.

Debido a los problemas operativos y conceptuales que presentan las funciones de utilidad con atributos múltiples, se han desarrollado un conjunto de métodos multicriterio discretos que podrían considerarse menos consistentes teóricamente pero más flexibles y adaptados para aplicarse a supuestos prácticos. Sin ánimo de ser exhaustivos, a continuación, se presentan tres de estas técnicas, el método Electre, el de las Jerarquías Analíticas (AHP) y el Axiomático de Arrow-Raydnaw. Estos métodos han enriquecido la literatura en este ámbito considerablemente, ya que han supuesto la base sobre la cual se han desarrollado gran cantidad de variantes y mejoras adaptadas a diferentes necesidades.

3.1. Métodos de superación: Método Electre.

El método ELECTRE I (Elimination and Choice Translating Algorithm), desarrollado por Benayoun, Roy y Sussman (1966) ha sido objeto de muchas mejoras a lo largo de la historia. En primer lugar, fue mejorado al ELECTRE II [Roy y Bertier (1971b)], después al ELECTRE III [Roy (1978)] y al ELECTRE IV [Roy y Hugonnard (1982)].


Según Barba y Romero (1987) este método es el origen y núcleo central de los **métodos de superación** (outranking methods). Munda (1996) explica que estos métodos se basan en el Axioma de comparabilidad parcial fundamental [Roy (1985)], según el cual, las preferencias pueden ser modeladas por una parte, estableciendo cuatro relaciones binarias: indiferencia, preferencia estricta, preferencia grande e incomparabilidad. Y por otra, estableciendo límites de diferencia e indiferencia mediante las denominadas funciones de límite. De esta forma, los criterios quedan delimitados y se pueden configurar como pseudo-criterios, como se puede ver en la siguiente figura.

No obstante, es preciso destacar que, según Ruiz (2015), las estructuras de preferencia utilizadas por los métodos de relaciones de superación recogen distintos tipos de criterios, dependiendo de la complejidad de su formulación y de la naturaleza del problema de decisión. Así se pueden distinguir: el criterio verdadero o real, el semi-criterio, el criterio de intervalo y el pseudo-criterio. Por ejemplo, mientras que el ELECTRE I utiliza criterios verdaderos, los cuales suponen el método más sencillo de formular un criterio, otras versiones posteriores más complejas utilizan los pseudo-criterios con el fin de mejorar la estructura de preorden.

Pese a que en la mayoría de métodos multicriterio la relación de dominancia es pobre, debido a que se ha llegado a ella a través del consenso de diferentes puntos de vista, estos métodos poseen una relación de dominancia más enriquecida ya que ésta solo puede

Figura 2: Representación gráfica de un pseudocriterio.

aPb	aQb	aIb bIa	bQa	bPa
área de preferencia estricta	área de preferencia débil	área de indiferencia	área de preferencia débil	área de preferencia estricta



Fuente: Munda (1996).

existir si hay información realista disponible. Entre las diferentes técnicas de superación existentes, a parte del método ELECTRE, es preciso mencionar por su importancia otras como el Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) [Brans y Vincke (1985)] y el método ORESTE [Roubens (1982)].

En referencia al método ELECTRE, éste ha dado lugar a numerosas variantes y adaptaciones. Algunas de ellas se pueden ver en Multi-Criteria Analysis and Regional Decision-Making [Nijkamp y Delft (1977)], como por ejemplo las referida al sistema de pesos.

ELECTRE se puede considerar uno de los métodos más usados durante estas últimas décadas. Este procedimiento permite reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes mediante una partición del conjunto eficiente en dos subconjuntos. Uno de alternativas muy favorables para el decisor y otro de alternativas menos favorables. En referencia al procedimiento, partiendo de una matriz de decisión, se utiliza la relación de sobreclasificación con el fin de obtener una matriz de superación. Una alternativa sobreclasifica a otra y pasa a formar parte del conjunto de alternativas más favorables cuando es al menos igual de buena, teniendo en cuenta el conjunto de atributos considerados. Para ello, es necesario que la concordancia entre ambas supere un índice, y la discordancia no supere otro, ambos establecidos previamente.

La sobreclasificación se caracteriza porque en ella no existe el supuesto de transitividad de preferencias que se utiliza en el resto de enfoques. Es decir, si E_1 sobreclasifica (S) a E_2 y E_2 S E_3 , no significa que E_1 S E_3 ya que las razones por las que el decisor prefiere E_1 a E_2 pueden ser muy diferentes a las que utiliza para preferir E_1 a E_3 .

Figura 3: Matriz decisional método ELECTRE IS.

Criterios Alternativas	Flujo Neto de Caja Total (r*) (g ₁) Maximizar	Flujo Neto de Caja Medio Anual (r) (g ₂) Maximizar	Plazo de Recuperación (p = meses) (g ₃) Minimizar	Tasa Anual Equivalente T.A.E. (g ₄) Maximizar
Proyecto 1: P ₁	1.2	0.30	3,5 = 42 meses	0,08
Proyecto 2: P ₂	2.3	0.33	3 = 36 meses	0,27
Proyecto 3: P ₃	1.57	0.39	2 = 24 meses	0,27
Proyecto 4: P ₄	1.33	0.26	4.4 = 52 meses	0,08
Proyecto 5: P ₅	1.60	0.40	2 = 18 meses	0,25
Ponderaciones: w _j	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄

Fuente: Fernández y Escribano (2002)

En el siguiente ejemplo de Fernández y Escribano (2002), utilizando el software del método ELECTRE IS, una mejora del ELECTRE I, con el fin de ayudar a la decisión multicriterio en la valoración y selección de alternativas de inversión, se puede ver cómo partiendo de una matriz de decisión, mediante el uso de unas ponderaciones y un índice de concordancia / discordancia, se obtienen en primer lugar, las matrices de concordancia y discordancia:

Figura 4: Matrices de concordancia y discordancia.

Nivel de Concordancia: $c=0.66$

Criterios verdaderos.

Ponderaciones: $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 1$

Matriz de concordancia

	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3	Proyecto 4	Proyecto 5
Proyecto 1	1	0	0	0,75	0
Proyecto 2	1	1	0,5	1	0,5
Proyecto 3	1	0,75	1	1	0,5
Proyecto 4	0,5	0	0	1	0
Proyecto 5	1	0,5	0,75	1	1

Matriz de discordancia

	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3	Proyecto 4	Proyecto 5
Proyecto 1	0	*	*	0	*
Proyecto 2	0	0	*	0	*
Proyecto 3	0	0	0	0	*
Proyecto 4	*	*	*	0	*
Proyecto 5	0	*	0	0	0

Fuente: Fernández y Escribano (2002).

Y por último, se genera la matriz de superación, a partir de las matrices de concordancia y discordancia:

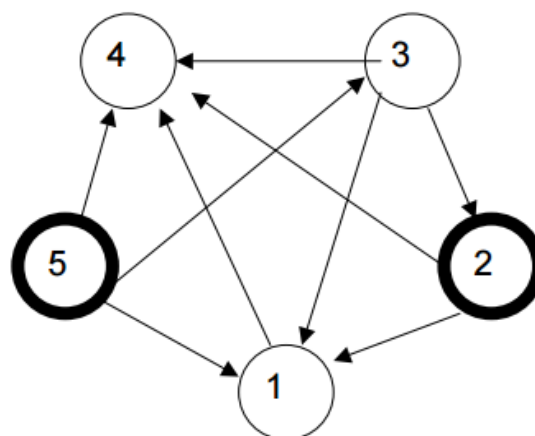
Figura 5: Matriz de superación.

	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3	Proyecto 4	Proyecto 5
Proyecto 1	1	0	0	1	0
Proyecto 2	1	1	0	1	0
Proyecto 3	1	1	1	1	0
Proyecto 4	0	0	0	1	0
Proyecto 5	1	0	1	1	1

Fuente: Fernández y Escribano (2002).

Asimismo, siguiendo a Romero (1993), hay que señalar que esa técnica se utiliza para elaborar un grafo en el que cada vértice del mismo representa una de las alternativas no dominadas. A partir de ese grafo, se desarrolla un subgrafo que forma el núcleo (Kernel) del conjunto de alternativas más favorables. Continuando con el ejemplo anterior, a partir de la matriz de superación, el software del método ELECTRE IS permite generar el denominado Grafo de Superación y el núcleo, compuesto por los proyectos 5 y 2, que casualmente coinciden al no ser necesario ni añadir ni eliminar vértices.

Figura 6: Grafo de superación del método Electre IS.



Fuente: Fernández y Escribano (2002).

Por último, añadir que Barba y Romero (1987), basándose en trabajos de otros autores como el de Vincke desarrollado en 1986, el de Fishburn, desarrollado en 1976, el de Jacquet-Lagrec publicado en 1982 o el de Boyssou, divulgado en 1986, explican que la principal debilidad, no sólo del método ELECTRE, sino también del resto, reside en su escasa axiomatización.

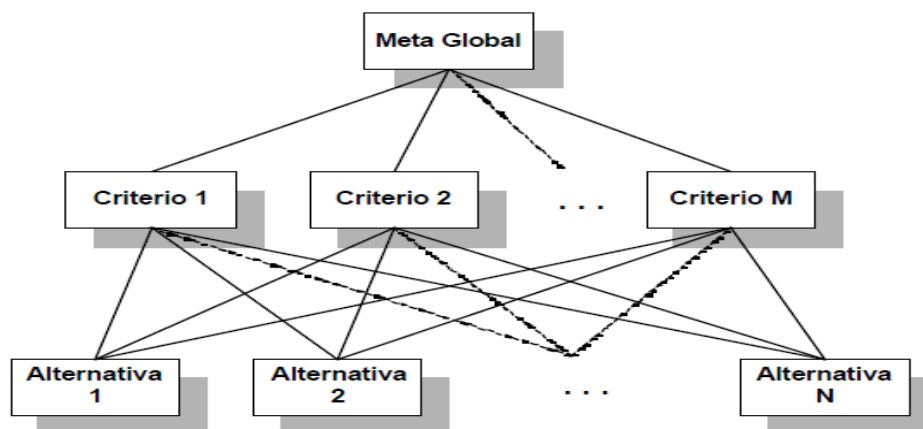
3.2. Método de las jerarquías analíticas.

El método de las jerarquías analíticas o método AHP (Analytic Hierarcgy Process) [Thomas L. Saaty (1977, 1980)] fue desarrollado con el fin de resolver el tratado de reducción de armamento estratégico entre los Estados Unidos y la Unión Soviética. Según García et al. (2013), *este método combina aspectos tangibles e intangibles para obtener en una escala de razón las prioridades asociadas a las diferentes alternativas.*

Se caracteriza por permitir de forma gráfica y eficiente la modelización del problema mediante una estructura jerárquica, la utilización de comparaciones por pares para incorporar las preferencias del decisor y el uso de una escala de razón válida para la toma de decisiones complejas. Además, gracias a su estructura jerárquica, el AHP facilita la organización de información de los problemas, su descomposición, análisis por partes y sintetización. Es decir, *trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión* (Saaty, Rogers y Pell, 1988).

Es preciso destacar que, según Romero (1993), su fundamentación teórica descansa en la teoría de grafos y en una formulación que consta de cuatro axiomas. El primero, explica que el decisor debe estar dispuesto a realizar comparaciones por pares de elementos de tal forma que, considerados los elementos, A_i y A_j , la intensidad de preferencia de A_i frente a A_j representada como A_i/A_j sea inversa a la preferencia de A_j respecto A_i , A_j/A_i . El segundo axioma indica que los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud con respecto a una misma propiedad, el tercero, que se puede determinar y controlar el tipo de dependencia de los elementos de dos niveles consecutivos en la jerarquía y dentro de un mismo nivel. Y, por último, el cuarto, trata acerca de que las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas. Estos axiomas determinan cómo formular y resolver el problema de decisión como una jerarquía y explicitar los juicios en forma de comparaciones por pares.

Figura 7: Arbol de Jerarquías.



Fuente: Toskano y Bruno (2005).

En Analytic Hierarchy Process [Saaty (1980)] divide este procedimiento en tres etapas diferentes, la modelización del problema, la valoración y priorización y la síntesis. No obstante, gracias al desarrollo del software *Expert Choice*, se puede añadir una etapa más, por la cual, realizando un análisis de sensibilidad se investigan con agilidad las modificaciones que sufren los resultados, en relación a cambios en alguno o algunos de los parámetros del modelo.

La primera etapa se encarga de la modelización y el análisis de una jerarquía en la que se incorporan los factores que son importantes y su interacción. Ésta conlleva la identificación del problema, la definición del objetivo, de los criterios, las alternativas y la construcción de un modelo jerárquico formado por tres niveles, las metas, los criterios y las alternativas.

Este modelo jerárquico se organiza de tal forma que los elementos de un mismo nivel son del mismo orden de magnitud y pueden relacionarse con los elementos del siguiente nivel. Mientras que en el nivel superior se sitúan las metas, los criterios y subcriterios ocupan los niveles intermedios y el nivel más bajo corresponde a las alternativas. Asimismo, es necesario que la jerarquía incluya todos los atributos relevantes y no incluya los no relevantes.

La segunda etapa se encarga de valorar los elementos a través de la comparación por pares. El decisor se encarga de establecer juicios de valor sobre la importancia relativa que para él tienen los elementos que cuelgan de un nodo con respecto al mismo. Utilizando la escala de medición que se puede ver en la Tabla 1, propuesta por Saaty (1980), el decisor puede cuantificar sus preferencias mediante valores numéricos.

Tabla 1: Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	Ambos criterios o elementos son de igual importancia
3	Débil o moderada importancia de uno sobre el otro
5	Importancia esencial o fuerte de un criterio sobre el otro
7	Importancia demostrada de un criterio sobre otro
9	Importancia absoluta de un criterio sobre otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente y extremadamente preferible

Fuente: Saaty (1994)

Los resultados quedan plasmados en matrices de comparaciones binarias o por pares, en las que se puede ver la importancia de un elemento frente a otro en relación a una propiedad común. Estas matrices de caracterizan por ser cuadradas, positivas y recíprocas. Cada componente a_{ij} es una estimación que muestra la intensidad de preferencia de un elemento i frente al j en cuanto a un aspecto común, por ello, la diagonal de la matriz adquiere valores $a_{ii} = 1$, como se puede ver en la figura 8.

En referencia a la tercera etapa, el principal objetivo trata a cerca de emitir juicios en cuanto a la importancia relativa de los elementos jerárquicos, para crear escalas de prioridades de influencia. En otras palabras, se ocupa de calcular un sistema de ratios o prioridades conforme a las expectativas

Figura 8: Matriz de comparaciones por pares. Requerimientos necesarios para la determinación del diseño conceptual de un buque LCU.

Criterios	C.	A.	D.	I.	Du
Confort	1,0	3,0	3,0	5,0	5,0
Autonomía	0,3	1,0	1,0	5,0	0,3
Desempeño	0,3	1,0	1,0	5,0	3,0
Interop.	0,2	0,2	0,2	1,0	0,3
Durabilidad	0,2	3,0	0,3	3,0	1,0

Fuente: Aranibar y Callamand (2008).

determinadas previamente y recogidas en las distintas matrices de comparaciones por pares, con el fin de informar acerca de la importancia de cada elemento en el proceso de decisión.

Se pueden identificar diferentes tipos de prioridades. Las prioridades locales se obtienen de forma directa a partir de la información recogida en las matrices de comparación. Según Jiménez (2002), estas matrices reflejan la importancia relativa de los elementos considerados en ese nivel, respecto al inmediatamente superior y se obtienen a partir de diferentes métodos, entre los que destaca el auto vector principal por la derecha. Las prioridades globales hacen referencia a la prioridad que se establece entre cada nodo respecto al inicial de su nivel jerárquico. Se calculan a partir de las prioridades locales aplicando el principio de descomposición jerárquica. En último lugar, la prioridad total de las alternativas se obtiene mediante la agregación de las prioridades globales. Ésta permite realizar la síntesis del problema, es decir, ordenar las alternativas y seleccionar las más indicadas para conseguir el objetivo propuesto considerando los elementos que intervienen en el problema.

Como se verá posteriormente, este modelo ha sido uno de los más utilizados en el ámbito económico-empresarial y a partir del mismo, se han desarrollado variantes adaptadas a diferentes contextos y necesidades. Una técnica derivada del AHP tradicional es el AHP difuso, que según Aristóteles (2015) incorpora los números triangulares a la técnica con el fin de indicar la importancia relativa que un factor de jerarquía tiene sobre otro y así construir las matrices de comparaciones con los mismos.

3.3. Método axiomático de Arrow-Raynaud.

Arrow y Raynaud (1986) señalan que el punto de partida de la mayoría de los métodos multicriterio discretos carece de una base axiomática apropiada y por ello, éstos pueden conducir al desarrollo de clasificaciones de las alternativas que resulten arbitrarias y no coherentes.

Con el fin de solucionar esta cuestión, Arrow y Raynaud (1986) vinculan los problemas de elección multicriterio discretos con la Teoría de la Elección Social, cuyo origen se remonta al libro *Elección social y valores individuales* [Arrow (1951)]. Esta teoría *se ocupa del estudio formal de procedimientos mediante los que una sociedad decide entre opciones alternativas en base a las preferencias de sus miembros* [Barberá (1977)]. Arrow y Raynaud explican que, considerando cada criterio como un agente social, la correlación entre dichos problemas y la elección social es perfecta.

Para el desarrollo de esta técnica, Arrow y Raynaud establecieron ciertas condiciones o propiedades (axiomas) vinculados a la teoría mencionada anteriormente. Estos axiomas, que habían sido desarrollados en parte años antes por Köler (1978), pueden resumirse y simplificarse en tres puntos según Munda (2008). El primero se basa en que las alternativas son clasificadas a través de un proceso gradual, el segundo explica que en cada etapa, la información utilizada se refiere únicamente a alternativas no clasificadas hasta dicho momento y el tercero se denomina *Axioma de prudencia* [Arrow y Raynaud (1986)] el cual, según Sabio, Mateos y Jiménez (2012) basa su idea principal en que no es prudente aceptar alternativas cuyo grado de conflicto sea alto y en consecuencia, puedan dar lugar a decisiones vulnerables. En relación al axioma anterior, según Romero (1993) debido a su carácter difuso y a su complejidad matemática ha generado un gran debate. Varios autores como por ejemplo Saaty (2006) lo discuten.

Figura 9: Matriz de clasificación.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
<i>a</i>	0	1.5	2.5	1	1
<i>b</i>	3.5	0	4	1.5	1.5
<i>c</i>	2.5	1	0	1	1
<i>d</i>	4	3.5	4	0	3
<i>e</i>	4	3.5	4	2	0

Fuente: Munda (2008)

correspondientes. Por último, sobre la matriz modificada, se vuelve a aplicar el proceso descrito anteriormente hasta obtener el elemento que corresponde a la alternativa mejor clasificada.

Utilizando la matriz que se muestra en la Figura 9 como ejemplo, se obtiene la matriz correspondiente a la Figura 10, una vez utilizado este algoritmo.

3.4. El problema de los métodos discretos.

Además del conjunto de métodos discretos que se han explicado, es relevante destacar la existencia de una amplia variedad de estas técnicas, como por ejemplo, los Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE) [Brans (1982)]. Según Romero (1993), pese a que este tipo de métodos han proliferado a lo largo de las últimas décadas, es difícil determinar cuál es mejor debido a que carecen de una base axiomática sólida. Esto provoca que las clasificaciones de alternativas proporcionadas por los diferentes métodos sean cuestionables. Asimismo, estas técnicas generalmente demandan información que resulta complicado obtener. En referencia al método ELECTRE, por ejemplo, hace falta conocer los pesos relativos, así como los umbrales de concordancia y discordancia, datos que se obtienen con cierta arbitrariedad. También, por ejemplo, en el método AHP es preciso comentar el problema de la inversión del orden (*Rank reversal phenomenon*). Belton y Gear (1983) explican que el proceso de ordenar dos alternativas puede alterarse por la inclusión de otra alternativa, aunque no conlleve información relevante. A consecuencia de esto, la ordenación de alternativas que ofrece el AHP puede ser arbitraria.

Figura 10: Matriz de clasificación tras eliminar alternativas *a* y *c*.

	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
<i>b</i>	0	1.5	1.5
<i>d</i>	3.5	0	3
<i>e</i>	3.5	2	0

Fuente: Munda (2008).

4. TÉCNICAS MULTICRITERIO CONTINUAS.

Como ya se ha comentado anteriormente, los métodos de decisión multicriterio continuos se caracterizan por que el decisor considera un número infinito de alternativas. Se podría decir que la mayoría de modelos de este tipo se han desarrollado para apoyar la toma de decisiones en ambientes de certeza, es decir, en situaciones donde el decisor

posee información completa a cerca de los estados de la naturaleza que se van a presentar en momentos posteriores.

Según García et al. (2013), en este ambiente, el problema de decisión queda reducido a un problema de optimización matemática caracterizado por la existencia de un único decisor, un conjunto de alternativas ($A \subset R^n$), siendo cada alternativa $X \in A$ de tal forma que $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, un conjunto factible compuesto por las alternativas posibles y válidas para el decisor ($K \subset A \subset R^n$), atributos o parámetros de comportamiento de las variables y funciones objetivo o criterios de evaluación utilizados para medir las consecuencias de las alternativas $F = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))$. Siguiendo este contexto, se puede destacar la existencia de dos agentes que determinan el proceso decisorio. Por una parte, el decisor es el individuo o grupos de individuos que toman la decisión final y por otra, el analista es el individuo o conjunto de individuos que analizan el problema y ayudan al decisor a elegir una elección.

Además, estos autores explican que en muchas ocasiones es imposible optimizar simultáneamente todos los objetivos al mismo tiempo ya que suelen existir conflictos entre los mismos o se carece de recursos necesarios para su consecución. Si no existe ningún punto dentro del conjunto factible que optimice a la vez todos los objetivos hay que recurrir a otros tipos de soluciones, de tal forma que se pueda obtener una solución no óptima, pero sí útil. Estas soluciones se clasifican en eficientes, soluciones compromiso y satisfactorias.

En este contexto, a continuación, se explicará en primer lugar la Matriz de Pagos, una herramienta de gran utilidad para resolver problemas multicriterio de carácter continuo. Asimismo, tras ello se procederá a plantear el Método de las Ponderaciones, el de las ϵ Restricciones y el Método Simplex, los cuales son técnicas que no necesitan información a priori a cerca del decisor. Y, por último, se expondrán la Programación por Compromiso y la Programación por Metas, técnicas que necesitan disponer de determinada información acerca de las preferencias del decisor con antelación.

4.1 Matriz de Pagos.

Una herramienta de gran utilidad para la resolución de problemas de decisión multicriterio continuos es la Matriz de Pagos ya que permite cuantificar el nivel de conflicto existente entre los objetivos considerados. La dimensión de la misma coincide con el número de objetivos y ésta se obtiene mediante la optimización individual de los mismos, calculando los valores obtenidos por el resto de objetivos en cada solución óptima.

Figura 11: Matriz de pagos.

Valores alcanzados	Valores óptimos	
	MB	MOTAD
MB	20.241.737	10.350.052
MOTAD	5.956.918	0

Fuente: Cañas, López y Gómez-Limón (2000).

Los elementos de la diagonal principal se denominan *punto ideal*, y representan el punto en el que todos los objetivos alcanzan su valor óptimo. También existe el punto anti-ideal, éste se compone del peor elemento de cada columna de la matriz y es útil, por una parte, para normalizar los objetivos medidos en diferentes unidades y con diferentes valores absolutos y por otra, para identificar la diferencia entre valores ideales y anti-ideales, información que es útil en el método de las ϵ restricciones.

Como se puede ver en el ejemplo al ser una matriz (2×2) , el punto ideal es $(20.241.737, 0)$ y el punto anti-ideal $(5.956.918, 10.350.052)$. Además, se puede identificar un conflicto entre objetivos ya que el óptimo de Maximización de Margen Bruto (MB) que adquiere una cuantía de 20.241.737, conduce a un valor de Minimización del riesgo (MOTAD) de 10.350.052 Uds. y viceversa. Es decir, la optimización de una supone la no optimización de otra.

4.2 Técnicas generadoras del conjunto eficiente.

García et al. (2013) explican que este tipo de técnicas permiten extraer las soluciones eficientes o no dominadas del conjunto de soluciones factibles. Las soluciones eficientes, denominadas también como óptimos de Pareto, $X^* \in K$ son aquellas soluciones para las cuales no se puede alcanzar una mejora en el objetivo sin que empeore ningún otro. El punto X^* es eficiente si no existe otro punto factible X que se prefiera al primero. Asimismo, se puede considerar frontera eficiente al conjunto de todas las soluciones eficientes.

En este contexto, es preciso definir la tasa de intercambio (*trade off*) entre dos objetivos como la cantidad de logro de un objetivo a la que se debe renunciar a cambio de conseguir un incremento unitario en otro objetivo, es decir, se encarga de medir la pérdida en un objetivo frente a la mejora en otro. En términos matemáticos, la tasa de intercambio entre dos objetivos f_j y f_k en relación con dos soluciones X_1, X_2 se representa como:

$$\frac{f_j(X_1) - f_j(X_2)}{f_k(X_1) - f_k(X_2)}$$

En referencia a su utilidad, se podría decir que son un buen índice para medir el coste de oportunidad de un criterio frente a los demás y también desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de los **métodos interactivos multicriterio**. Entendiendo por métodos interactivos, según Martín et al. (2005) el conjunto de técnicas que necesitan información del decisor para seleccionar la solución más satisfactoria y contrastar con él las preferencias sobre las características de esta solución, de tal forma que el intercambio de información se produce continuamente a lo largo del proceso de resolución, con el fin de que las distintas soluciones se vayan adaptando a la estructura de preferencias del decisor. Un ejemplo de método interactivo es el Método STEM [Benayoun (1971)].

Analíticamente, la obtención del conjunto eficiente se obtiene a partir de las **técnicas generadoras**. Mediante las mismas, el problema se resuelve basándose exclusivamente en su estructura matemática y una vez resuelto, se muestran las soluciones al decisor. Es preciso destacar la inexistencia de un intercambio de información previo con el mismo. A continuación, se explicarán las tres técnicas generadoras del conjunto eficiente más utilizadas habitualmente debido a su potencial.

4.2.1. Método de las Ponderaciones.

Según Fernández y Huelin (2007), el Método de las Ponderaciones, [Gass y Saaty (1955), Zadeh (1963)] se basa en la idea de convertir el problema multiobjetivo en uno escalar de forma que se construya una función objetivo que sea suma de las funciones objetivo de partida, ponderadas según un peso relativo λ_i que se le asigne a cada una de ellas. La optimización de dicha función objetivo, $f(\lambda)$, genera para cada conjunto de pesos un punto extremo eficiente, por lo que si se varían los parámetros de los pesos se puede obtener una aproximación al conjunto eficiente.

Siguiendo el teorema de Zadeh (1963) que demuestra que $X^* \in A$ es eficiente si, y solo si, existe un vector $\lambda \in R^p$ con $\lambda_i > 0 \forall i$, se puede deducir que X^* es óptimo para

$$f(\lambda) = \sum_i \lambda_i f_i(X)$$

Por ello, formulándose el problema

$$\text{Máx } (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))$$

$$\text{s. a. } X^* \in K$$

Se deduce el programa

$$\text{Máx } \sum_{i=1}^p \lambda_i f_i(X)$$

$$\text{s. a. } X^* \in K, \quad \sum_{i=1}^p \lambda_i = 1, \quad \lambda_i \geq 0$$

Estos pesos o ponderaciones tienen varias funciones, por una parte, facilitan la resolución del problema al transformarlo en un problema con un único objetivo, constituido por la agregación de todos los objetivos ponderados. Por otra, proporcionan información acerca de la importancia relativa que el analista asigna a cada objetivo y eliminan las unidades de medida al normalizarlas. Habitualmente se suele cumplir el supuesto de que la suma del conjunto de ponderaciones debe ser igual a la unidad.

Además, se debe comprobar, por una parte, que los pesos no concuerdan con las preferencias del decisor, si no que se asignan por el analista de forma arbitraria, y por otra, que para cada vector de pesos se obtiene al menos un punto extremo eficiente y que variando los pesos se puede generar el conjunto eficiente.

En referencia a algunos inconvenientes que presenta este método, según García et al. (2013) es preciso destacar que, debido a la existencia de distintas combinaciones de pesos que pueden llevar a un mismo punto extremo, o si alguno de los pesos es cero y existen óptimos alternativos, existe el riesgo de que la solución generada no sea eficiente. Además, puede ser necesario resolver el problema monocriterio propuesto q^{p-1} veces, siendo p el número de objetivos y q el número de vectores de pesos que se quieran establecer.

Es preciso destacar por último que, según estos mismos autores, *mediante este método solo se pueden obtener los puntos extremos eficientes debido a que detecta como punto eficiente el punto de tangencia de la poligonal que define el conjunto eficiente con la familia de rectas en caso de dos objetivos, o de hiperplanos en caso de p objetivos. Por ello, es esencial la correcta asignación de las ponderaciones.*

4.2.2. Método de las ε - restricciones.

Según Vitoriano (2010) el Método de las ε - restricciones, [J.A. Marglin (1967)], consiste en optimizar uno de los objetivos e incorporar el resto como restricciones paramétricas, ε , de tal forma que para cada conjunto de valores que se dé al conjunto de términos situados a la derecha de las restricciones (términos independientes) se genera un punto eficiente.

Planteado el programa multiobjetivo

$$\text{Máx } (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))$$

$$\text{s. a. } X^* \in K$$

Al aplicar esta técnica, el programa se transforma en

$$\text{Opt } f_k(X)$$

$$\text{s. a. } X \in K \quad f_j(X) \geq \varepsilon_j \text{ (ó } f_j(x) \leq \varepsilon_j); j = 1, \dots, K-1, \dots, k+1, \dots, p.$$

Cuando el objetivo que se introduce en la restricción se desea maximizar, el sentido de la desigualdad de la restricción es $f_j(X) \geq \varepsilon_j$, por el contrario, si el objetivo se desea minimizar, el sentido de la desigualdad es $f_j(x) \leq \varepsilon_j$. Asimismo, los valores anti-ideal e ideal de cada objetivo son el límite inferior y superior del intervalo dentro del cual puede variar cada ε_j . Al resolver el problema para cada ε_j se generan puntos tanto extremos como interiores al conjunto eficiente. Esto ocurre sólo cuando las restricciones paramétricas son activas en la determinación del óptimo, entendiendo como activas, al hecho de que se verifiquen como igualdades, $(f_j(X^*) = \varepsilon_j, \forall j \neq k)$. No obstante, si en el óptimo alguna de las restricciones no es activa, por lo que se verifica como desigualdad y existen óptimos alternativos, la solución generada puede no ser eficiente. Esta situación, pese a ser contemplada de forma teórica, no se suele presentar en la práctica habitualmente.

Por último, en cuanto a su forma de operar, es preciso destacar que, si el número de objetivos es P y el número de valores dados al vector, cuyos componentes son los términos independientes de los objetivos incluidos en forma de restricción, es q , se deberán resolver p^{q-1} programas de optimización paramétricos.

4.2.3. Simplex Multicriterio.

Según García et al. (2013) el Método Simplex Multicriterio es el único que permite generar un conjunto eficiente por completo. Este método se basa en el simplex tradicional de Dantzig (1947). El Método Simplex de Dantzig trabaja basándose en ecuaciones y debido a que las restricciones iniciales que se modelan mediante programación lineal no lo son, hay que convertir estas inecuaciones en ecuaciones utilizando unas variables denominadas de holgura y exceso relacionadas con el ámbito al cual hace referencia la restricción. Estas variables, que suelen estar representadas por la letra S , se suman si la restricción es de signo \leq y se restan si la restricción es de signo \geq formando una matriz denominada Matriz Identidad.

Figura 12: Inecuaciones modeladas mediante programación lineal y transformadas en ecuaciones.

Inecuaciones modeladas mediante programación lineal

$$2X_1 + 3X_2 + 1X_3 \leq 500$$

$$3X_1 + 1X_2 + 1X_3 \leq 700$$

$$4X_1 + 2X_2 + 2X_3 \leq 800$$

Inecuaciones transformadas en ecuaciones

$$2X_1 + 3X_2 + 1X_3 + 1S_1 + 0S_2 + 0S_3 = 500$$

$$3X_1 + 1X_2 + 1X_3 + 0S_1 + 1S_2 + 0S_3 = 700$$

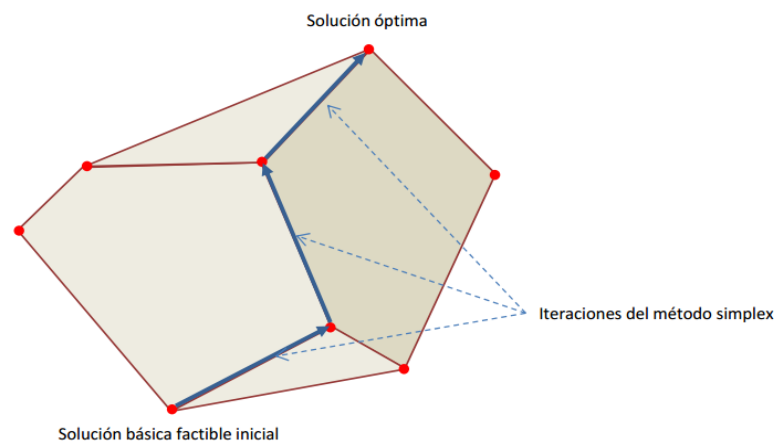
$$4X_1 + 2X_2 + 2X_3 + 0S_1 + 0S_2 + 1S_3 = 800$$

Matriz Identidad

Fuente: Salazar López (2016)

En referencia a su operativa, funciona mediante un algoritmo de pivotado denominado Algoritmo Simplex. Según Ruz (2016), consiste en partir de un punto extremo inicial cualquiera (solución básica factible) y mediante unos criterios muy precisos operar de forma iterativa pasando de un punto extremo (el cual forma parte del conjunto eficiente y posee variables básicas o iniciales) a otro adyacente (el cual no posee variables básicas pero si variables de holgura o de exceso) que mejora (o por lo menos no empeora) la función objetivo de procedencia, alcanzado la solución óptima en un número finito de pasos.

Figura 13: Representación gráfica del Modelo Simplex.



Fuente: Ruz (2016).

A este modelo, el simplex multicriterio añade una subrutina que le permite comprobar la eficiencia o no de cada punto extremo obtenido. Una de las principales desventajas que presenta este método está en la complejidad de cálculo que requiere su aplicación, por ello, su operatividad práctica es escasa. Según García et al. (2013), los softwares que hay desarrollados actualmente permiten hacer frente a problemas de un tamaño moderado.

Es preciso destacar que la determinación del conjunto eficiente completo no sólo es difícil, también carece de utilidad práctica, ya que, desde la perspectiva decisional, son los puntos extremos son los que proporcionan información de mayor valor. Existen una serie de algoritmos que permiten obtener el conjunto factible completo. Si los problemas son lineales los algoritmos carecen de complejidad, no obstante, el conjunto eficiente suele ser extenso y por ello es necesario reducirlo mediante dos formas diferentes. O se trabaja con intervalos de pesos en lugar de utilizar pesos fijos, obteniendo así la parte del conjunto eficiente que tiene más interés para el decisor, o se deben utilizar unas técnicas denominadas *poda* y *filtrado* que permiten descartar las soluciones no excesivamente diferentes de otras soluciones eficientes previamente calculadas.

Tras obtener el conjunto eficiente completo o parte de él, se deberá elegir entre las soluciones eficientes que se consideren más adecuadas para el decisor mediante la introducción de sus preferencias.

4.3 Técnicas con información a priori.

Según Torres (2009), estas técnicas se caracterizan por la necesidad de poseer información acerca de las preferencias del decisor con antelación y su principal objetivo es determinar las soluciones que mejor se adaptan a las preferencias del decisor. Entre ellas, destacan la programación por compromiso y la programación por metas.

4.3.1. Programación por compromiso.

Mediante la programación por compromiso, según García et al. (2013), se pretende utilizar el punto ideal como un punto de referencia para el decisor. Debido a que en este punto cada objetivo alcanza su valor óptimo, se puede deducir que, si el decisor tiene un comportamiento racional, intentará alcanzar el punto más cercano al ideal. Yu y Zeleny (1975) desarrollaron las técnicas de programación por compromiso que se han consolidado como uno de los enfoques de resolución de problemas multiobjetivo de mayor potencia y con un amplio campo de aplicaciones.

Estas técnicas se apoyan en el *Axioma de Zeleny* (1973), el cual establece que, dadas dos soluciones posibles en el espacio de objetivos, se preferirá la que se encuentre más próxima al punto ideal. De esta forma, al obtener los puntos o subconjuntos del conjunto eficiente que estén más próximos del conjunto ideal, se permite reducir el tamaño del conjunto eficiente. Las soluciones más cercanas al punto ideal se denominan soluciones compromiso y a todas ellas, conjunto compromiso. Éstas muestran políticas equilibradas ya que son soluciones eficientes al no subordinar un objetivo a otro.

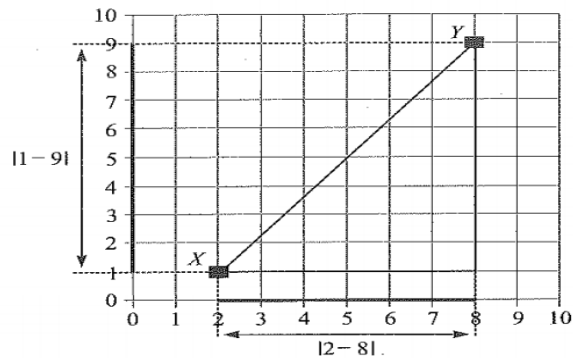
El principal medidor de este método es la distancia, que actúa como un indicador de las preferencias del decisor. Existen diferentes concepciones de distancia, aunque la más conocida es la **euclídea**. No obstante, García et al. (2013) proponen otra forma de considerar la distancia mediante la idea de la *familia de métricas L_p* , en ella, la distancia, P , está comprendida entre 1 y ∞ . Si $p = 1$ se obtiene la distancia Manhattan. Es la más larga de la familia y su nombre se debe a la forma del distrito de Manhattan en Nueva York. Si $p = 2$ se obtiene la distancia euclídea, por ello, se puede decir que esta distancia forma parte de un conjunto de diferentes distancias. Si $p = 3$ se obtendría L_3 etc... No obstante, es preciso destacar que en el caso de $p=\infty$, la expresión por la cual se interpreta la distancia carece de sentido, esto ha conducido a la denominada distancia de Tchebycheff, la más corta del conjunto.

Cuando los puntos entre los que se calcula la distancia forman parte de un plano R^2 , las distancias Manhattan, Euclídea y de Tchebycheff se pueden representar fácilmente. La figura 14 ofrece una esquematización gráfica de las mismas. La Manhattan corresponde a la suma de las longitudes de los catetos del triángulo rectángulo, la euclídea es la longitud de la hipotenusa y la Tchebyeff es el mayor de los catetos.

En referencia a la determinación de las soluciones compromiso, en un primer lugar se debe establecer el grado de proximidad h_j entre el objetivo j –ésimo f_j y su valor ideal f_j^* . A continuación, se deben normalizar las medidas de todos los objetivos con el propósito de agregar los distintos grados de proximidad a los mismos posteriormente.

Tras ello, el siguiente paso consiste en asignar a los valores ideales de cada objetivo, d_i , una ponderación w_i como indicador de la preferencia que se asocia a la divergencia entre la realización del objetivo y su valor ideal. Debido a que las soluciones compromiso son las más próximas al ideal, para obtenerlas hay que resolver el problema de optimización que se muestra a continuación:

Figura 14: Interpretación geométrica de las distancias Manhattan (L_1), Euclídea (L_2) y de Tchebyeff (L_∞).



Fuente: García et al. (2013).

$$\min L_p = \min \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n w_i^p \left| \frac{f_i^* - f_i(X)}{f_i^* - f_{*i}} \right|^p} \quad 1 \leq p < \infty$$

S.a. $X \in K$

Es preciso destacar que, para $p = \infty$ y $p \neq 1$, la forma de resolución varía del resto. En referencia a la primera, se debe minimizar la máxima desviación entre todas las desviaciones individuales mediante el siguiente problema de programa lineal.

$$\min L_\infty = d$$

s. a. $X \in K$

$$w_i \left| \frac{f_i^* - f_i(X)}{f_i^* - f_{*i}} \right| \leq d \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

En cuanto a métricas distintas de $p = 1$ es necesario recurrir a algoritmos no lineales, lo que, según García et al. (2013), constituye una dificultad operativa que puede reducir la potencialidad de esta técnica, pues el problema a resolver puede conllevar una tarea computacional casi inalcanzable.

No obstante, el método desarrollado por Zeleny (1975) ha sido mejorado por otros autores como Yu (1985) que demostró que para los problemas con dos objetivos el

conjunto compromiso está comprendido entre L_1 y L_∞ . Asimismo, Romero et al. (1999) demostraron que para problemas con más de dos objetivos y bajo condiciones muy generales el conjunto compromiso también está acotado por las soluciones obtenidas a partir de L_1 y L_∞ . Mientras que la solución perteneciente a L_1 se corresponde con una situación en la que se optimiza la suma ponderada y normalizada de los logros en cada objetivo, caracterizada por la posibilidad de estar fuertemente desequilibrada, la solución de la métrica de Tchebycheff, L_∞ se caracteriza, según Ballesteros y Romero (1991) por ser equilibrada debido a que las discrepancias normalizadas y ponderadas entre el valor alcanzado por cada objetivo y sus respectivos ideales son iguales. Esta solución tiene especial utilidad en los procesos de elección en los que el decisor considere apropiado que no existan desequilibrios importantes entre los niveles de logro conseguidos para cada objetivo en relación al nivel ideal.

4.3.2 Programación por metas.

A la hora de tratar problemas de gran envergadura, es preciso tener en cuenta que no todos los métodos analizados hasta el momento pueden ser útiles, debido tanto a la elevada complejidad de cálculo, como al gran tamaño del conjunto eficiente.

La programación por metas surgió con el propósito de hacer frente a la incapacidad de optimizar todos los objetivos al mismo tiempo. Ésta se asienta sobre los principios que estableció Simon (1955, 1957), en los que se explica que en contextos decisoriales complejos el decisor suele intentar que una serie de metas relevantes se aproximen lo más posible a unos niveles de aspiración prefijados con anterioridad. En otras palabras, en un primer momento se plantean los problemas decisorios complejos como la consecución de unas metas fijadas previamente, y tras ello, se evalúa el grado de consecución de las metas y se fijan otras nuevas. En conclusión, este proceso es dinámico y ofrece la posibilidad de controlarlo.

Esta técnica fue creada por Charnes, Cooper y Ferguson (1955), no obstante, su desarrollo y divulgación se atribuyen a Ijiri (1965), Lee (1972) e Ignizio (1976). Desde entonces se desarrollaron gran cantidad de publicaciones que se centran tanto en aspectos teóricos como en prácticos. En la actualidad, la programación por metas es uno de los métodos más utilizados, principalmente en problemas complejos de gran tamaño.

Según García et al. (2013) el decisor actúa primero incorporando al proceso información explícita acerca de sus preferencias y prioridades. Además, explican que existen diferentes objetivos, $F_i(X)$, objetivos que se pretenden maximizar con niveles de aspiración u_i . $F_j(X)$, objetivos a minimizar con niveles de aspiración u_j y $F_k(X)$, objetivos para los que se trata de alcanzar el valor exacto del nivel de aspiración u_k .

En relación a lo anterior, el problema se puede formular como:

$$\text{mín } (n_i, p_j, n_k + p_k)$$

$$\text{s. a. } X \in K$$

$$F_i(X) + n_i - p_i = u_i F_j(X) + n_j - p_j = u_j$$

$$F_k(X) + n_k - p_k = u_k$$

$$n_i, p_i, n_j, p_j, n_k, p_k \geq 0$$

Tras ello, se debe determinar la minimización de las variables no deseadas. Existen varios enfoques que se diferencian entre sí en la forma de representación de las preferencias del decisor y por ello, el resultado obtenido será desigual. Los más conocidos son la programación por metas ponderadas y la programación por metas lexicográficas.

4.3.2.1 Programación por metas ponderadas.

Este método es el más intuitivo, se debe minimizar: $\min (n_i + p_j + n_k + p_k)$. No obstante, presenta una serie de inconvenientes. En primer lugar, los objetivos pueden estar medidos en diferentes unidades, en segundo lugar, este enfoque sugiere que el decisor da la misma importancia al logro de todas las metas, hecho que no es cierto habitualmente. Y, en tercer lugar, es preciso destacar la existencia de soluciones sesgadas hacia un mayor cumplimiento de las metas con niveles de aspiración más elevados.

Estos inconvenientes pueden solucionarse mediante la minimización de la suma ponderada de las variables de desviación en términos porcentuales, lo que se puede considerar una normalización. Para ello, se debe multiplicar cada variable de desviación por la ponderación que el decisor le otorgue (w_i , w_j y w_k) y dividirla por su correspondiente nivel de aspiración.

De esta forma, la función a minimizar con la que se representa el problema es:

$$\min \left(w_i \frac{n_i}{u_i} + w_j \frac{p_j}{u_j} + w_k \frac{n_k + p_k}{u_k} \right)$$

4.3.2.2 Programación por metas lexicográficas.

Según García et al. 2013, a través de este método el decisor constituye grupos ordenados de metas según el orden rígido de prioridades excluyentes. En un primer momento se deben alcanzar las metas de mayor prioridad, tras ello, el objetivo será alcanzar las metas situadas en el segundo nivel de prioridad, después las del tercer nivel y con el resto se continua de forma sucesiva.

Para ello, se deben minimizar lexicográficamente las variables de desviación no deseadas:

$$\text{Lex } \min (n_i, p_j, n_k + p_k)$$

Se deberán resolver tantos problemas de programación matemática como niveles de prioridad se hayan establecido, además, se realiza un análisis inicial con el fin de detectar la existencia de puntos factibles en el problema. Se pueden distinguir una serie de etapas en dicho proceso.

En el nivel 0 se debe determinar el conjunto factible o el conjunto de puntos que son factibles entre todas las alternativas. En el nivel 1, se minimizan las variables de desviación no deseadas del primer nivel de prioridad. Suponiendo que se pretende maximizar f_i , se resuelve el problema de la siguiente forma:

$$\min n_i$$

$$s. a. X \in K$$

$$f_i(X) + n_i - p_i = u_i$$

$$n_i, p_i \geq 0$$

Cuando $n_i = 0$ la solución obtenida, X^* , satisface la primera meta y por consiguiente, se procede a satisfacer la siguiente. Si $n_i > 0$ la meta no se satisface y el problema finaliza, siendo X^* la solución más cercana al cumplimiento de la meta.

En el nivel 2, se minimizan las variables de desviación no deseadas existentes en él, suponiendo que se desea minimizar f_j , se presenta el siguiente problema lineal:

mín p_j

s. a. $X \in K$

$$f_i(X) + n_i - p_i = u_i$$

$$n_i = 0$$

$$f_j(X) + n_j - p_j = u_j$$

$$n_i, p_i, n_j, p_j \geq 0$$

Al igual que en el primer nivel cuando se resuelve el problema planteado, si $p_i = 0$, la solución X^{**} satisface la meta del segundo nivel y se procede a optimizar el tercero. Si $p_j > 0$, X^{**} satisface la primera meta y es la solución más cercana al cumplimiento de la segunda.

Al resolver el tercer nivel *mín* $(n_k + p_k)$, de la misma forma que los anteriores, pueden ocurrir diferentes situaciones. Si $n_k = p_k = 0$, la solución X^{***} satisface la meta del tercer nivel y todas las metas establecidas por el decisor. Si n_k o $p_k > 0$ la solución no es satisfactoria para dicho nivel, pero es la solución más cercana al cumplimiento de la tercera meta. De esta forma, el proceso se desarrollaría sucesivamente.

Entre otros aspectos que caracterizan la programación por metas, según García et al. (2013), es preciso destacar que las soluciones satisfactorias no siempre son eficientes, cuando ocurra esto, se dice que la solución no es racional. Además, en ambos enfoques de programación por metas, si no se encuentra una solución satisfactoria, el decisor puede cambiar el orden de los niveles de prioridad, analizar si existen metas redundantes, adaptar la meta con el fin de que se pueda cumplir, o en el enfoque lexicográfico, cambiar la excesiva priorización de las metas, la fijación de los niveles de aspiración demasiado optimistas o la inclusión de metas a ambos lados que restrinjan el espacio satisfactorio. Asimismo, apuntar que el enfoque lexicográfico es adecuado para problemas en los que no sea conveniente la compensación entre objetivos, mientras que en el enfoque de metas ponderadas, estos si se compensan.

5. APLICACIONES PRÁCTICAS DE LAS TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.

Según Berumen y Llamazares (2007), desde tiempos remotos ha sido constante el interés por buscar alternativas que “ayuden a decidir” y, con base en ello, desarrollar modelos que fomenten la competitividad. Pese a que los modelos actuales no son capaces de garantizar que se está asumiendo una decisión en la dirección correcta, debido a las

claras limitaciones que presentan (como lo es la falta de formalización de la que padecen), es preciso destacar su relevancia. Los autores anteriormente mencionados, basándose en publicaciones de otros como Kahl (1970), Argyris (1976), Kahneman y Tversky (1979) y, posteriormente, De Vicente (1999) y De Vicente, Manera y Blanco (2004) han mostrado que estos métodos son un referente de notable valor, debido a que permiten identificar elementos de respuesta tangibles a preguntas y problemas que se presentan en la toma de decisiones.

Asimismo, estos autores también hacen hincapié en que la búsqueda de la eficiencia y la productividad de las empresas, de los sectores industriales y de las regiones contribuye a la adopción de metodologías de apoyo en la toma de decisiones, en general, y para el fomento de la competitividad, en particular, en escenarios donde intervienen múltiples variables o criterios de selección. Además, como se ha comentado anteriormente, las condiciones actuales que presenta el entorno se caracterizan por la rapidez y la intensidad con las que suceden los cambios, lo cual implica que los agentes económicos estén obligados a tomar decisiones constantemente, que dependen de múltiples criterios o atributos de tipo cuantitativo, cualitativo o de una mezcla de ambos. A partir de esto se puede deducir que cada vez es más necesario el uso de metodologías que permitan disminuir el riesgo a la hora de tomar decisiones, con el fin de alcanzar mejores niveles de competitividad en el seno de las empresas, los sectores industriales y las regiones.

En este contexto, *los métodos de decisión multicriterio, lejos de ser considerados elementos infalibles y certeros, cuya utilización permite encontrar una solución óptima y definitiva, son una base, sustentada en elementos científicos, que aporta mejoras distintivas para asumir una decisión.* [Berumen y Llamazares (2007)]. Según Hammond, Keeney y Raiffa (2001), estos métodos se aplican a decisiones basadas en componentes cuantificables que permiten ponderar el riesgo y, en virtud de ello, son capaces de elegir la alternativa que resulte ser la más satisfactoria en el mejor de los casos o la menos insatisfactoria en el peor de los casos.

A continuación, se muestran algunos campos en los que la aplicación de este tipo de técnicas puede resultar de gran utilidad, como el de la selección de carteras para los inversores, el de la licitación pública, la determinación del impacto ambiental y la valoración de activos medioambientales, el reemplazamiento de equipos industriales o el de la selección de proveedores, con el objetivo de demostrar que estas técnicas permiten mejorar la toma de decisiones en una amplia diversidad de ámbitos, así como de contextualizar su uso en los mismos.

5.1 La selección de carteras.

Según Padilla y Guerrero (2005) *el problema de la selección de carteras se comenzó a estudiar tras la Segunda Guerra Mundial, cuando el fuerte crecimiento económico y los cambios en la tecnología y los mercados originan la necesidad de generar nuevos criterios sistemáticos de selección de inversiones.* Desde entonces, tras desarrollarse el Modelo de Markowitz (1952) basado en la maximización del valor descontado de los rendimientos futuros, se ha producido una gran proliferación de técnicas cuya principal finalidad es aconsejar al inversor a tomar una decisión acertada en materia de reparto de sus fondos entre los distintos activos disponibles en el mercado.

Con el objetivo de evitar las limitaciones que se presentan al utilizar un modelo como el de Markowitz (1952), estas autoras explican que la mayoría de dichas técnicas utilizan varios criterios a la hora de determinar cuál es la mejor alternativa de inversión, no

obstante, debido a que los criterios utilizados suelen ser incompatibles entre sí, el decisor se encuentra con un conjunto de combinaciones de títulos, en el cual, cada combinación es óptima para un criterio específico, pero no para el resto, en detrimento de obtener una cartera óptima para todos ellos.

En este contexto, mientras que la Programación Matemática tradicional es inoperativa, los Métodos de Programación Multicriterio permiten identificar una cartera de activos óptima para el conjunto de criterios tenidos en consideración. Padilla y Guerrero (2005) indican que de este abanico de técnicas destacan en primer lugar las Técnicas generadoras del Conjunto Eficiente desarrolladas por Baumol en 1973 y Mao y Brewster en 1974 y también en este mismo año por, Philippatos y Wilson. No obstante, explican que estas técnicas plantean graves dificultades a la hora de enfrentarse a problemas de gran tamaño, como la complejidad computacional o la existencia de un conjunto eficiente de gran tamaño que dificulta la elección de la alternativa final por parte del decisor. Además, no permiten al mismo expresar sus preferencias desde un primer momento ni, según Molina (2000) establecer niveles de aspiración entre objetivos incompatibles.

En segundo lugar, estas autoras destacan por su utilidad la Programación por Metas ya que permite solucionar los problemas que presentan las Técnicas Generadoras del Conjunto eficiente. Como también señalan, este método de decisión se comenzó a aplicar en el ámbito de la selección de carteras en la década de 1970 gracias a las aportaciones en 1973 de Lee y Lerro, y de Kumar, Philippatos y Ezzell en 1978 y se siguió desarrollando posteriormente gracias a las aportaciones de 1980 de otros autores como Lee y Chesser. No obstante, aclaran que su esencia radica en la adaptación al Método de Programación por Metas tradicional del modelo de Markowitz y del modelo de Sharpe “Capital Asset Pricing Model (CAPM)” desarrollado entre 1964 y 1966.

Asimismo, Padilla y Guerrero (2005) señalan que tras las aportaciones de Lee y Chesser se desarrollaron mejoras como el uso de modelos interactivos o del Arbitrage Pricing Theory (ATP), desarrollado por Ross en 1976 en sustitución del CAPM con el fin de valorar el riesgo. Otras aportaciones a mencionar en este contexto son las planteadas por Tamiz, Hasham y Jones en 1996. Asimismo, otros autores desarrollaron trabajos cuya finalidad era orientar específicamente a los asesores financieros en la selección de carteras de sus clientes, como Levary y Avery en 1984, o Schniederjans, Zorn y Jhonson en 1993 o Powell y Premachandra en 1998.

En tercer lugar, es necesario mencionar que también se aplican otras técnicas multicriterio a este ámbito, por ejemplo, autores como Aguarón, Moreno y Santamaría (1993) aplican la metodología AHP y Fernández y Escribano (2002) utilizan el software ELECTRE IS, derivado del ELECTRE clásico, para la valoración y selección de alternativas de inversión de carteras.

Por último, es preciso destacar la existencia de muchas otras variantes a los métodos comentados anteriormente, como por ejemplo el que proponen Padilla y Guerrero (2005) basado en la Programación por Metas Lexicográficas Entera, una variante de la tradicional, que recoge aspectos como la búsqueda de una cartera no dominada por otras, la consideración de los costes asociados o las ventajas que se obtienen de la diversificación.

5.2 La licitación pública.

Según Cereigido (2012) la licitación pública es una de las principales vías que utilizan gran cantidad de empresas a la hora de conseguir contratos. En muchas ocasiones, la

competencia es elevada tanto en número de licitadores como en márgenes de beneficio y la decisión de elegir a uno u otro se vuelve más compleja. El hecho de seleccionar una oferta más ventajosa que otra, permite ahorrar recursos al Estado para destinarlos a otros proyectos.

En este contexto, según Casañ (2013) habitualmente, el método utilizado a la hora de comparar ofertas competitivas y seleccionar la más adecuada, tanto en licitaciones de la administración pública como del sector privado, consiste en establecer una serie de criterios, así como su peso relativo.

El artículo 150 del texto refundido de la Ley de Contratos del Sector Público explica que se deben utilizar criterios directamente vinculados al objeto del contrato, como por ejemplo, la calidad, el precio, la fórmula utilizable para revisar las retribuciones ligadas a la utilización de la obra o a la prestación del servicio, el plazo de ejecución o entrega de la prestación, el coste de utilización, las características medioambientales o vinculadas con la satisfacción de exigencias sociales que respondan a necesidades definidas en las especificaciones del contrato, la rentabilidad, el valor técnico, las características estéticas o funcionales, la disponibilidad y coste de los repuestos, el mantenimiento, la asistencia técnica, el servicio postventa u otros semejantes.

Asimismo, añade que es necesario el uso de más de un criterio en la adjudicación de determinados contratos, como por ejemplo, aquéllos cuyos proyectos o presupuestos no hayan podido ser establecidos previamente y deban ser presentados por los licitadores, aquéllos para cuya ejecución facilite el órgano, organismo o entidad contratante materiales o medios auxiliares cuya buena utilización exija garantías especiales por parte de los contratistas o aquéllos que requieran el empleo de tecnología especialmente avanzada o cuya ejecución sea particularmente compleja.

Los criterios que se utilicen en la adjudicación de una oferta se determinarán por el órgano de contratación y se detallarán en el anuncio, en los pliegos de cláusulas administrativas particulares o en el documento descriptivo. Uno de tantos ejemplos, puede ser el Pliego de Cláusulas administrativas particulares que ha emitido el Ayuntamiento de Logroño para la impresión y distribución de los carteles y programas de las fiestas de San Bernabé y San Mateo 2017. En ella, se utilizan diferentes criterios para la valoración de las ofertas. Por una parte, se utilizan criterios objetivos que permiten una puntuación máxima de 75 puntos: hacer más ejemplares de los exigidos y reducir los plazos de entrega y el porcentaje de publicidad. Por otra, se utilizan criterios subjetivos que permiten obtener hasta 25 puntos: uso de papel 100% reciclado, blanqueado mediante procesos libres de cloro con un nivel de blancura entre el 70 y el 90%, uso de Tintas ecológicas libres de disolventes y la Implementación de las Nuevas Tecnologías en la distribución de los programas.

En referencia a la ponderación relativa atribuida a los diferentes criterios, Casañ (2013) explica que suele establecerse a través de una puntuación determinada por la importancia que se quiere atribuir a cada uno de ellos y añade que esto presenta un inconveniente, no existe ningún método que garantice la objetividad del peso asignado. Otro inconveniente se localiza a la hora de comparar las distintas alternativas u ofertas presentadas. Debido a que existen criterios que se evalúan mediante fórmulas matemáticas como el precio ofertado, la baja ofertada, el plazo de ejecución o el plazo de redacción del proyecto y otros de forma subjetiva como la calidad o el diseño, el proceso de comparación de las alternativas se vuelve más complejo.

Con el fin de solucionar dichos problemas a la hora de seleccionar al adjudicatario y establecer el peso de los diferentes criterios, además del posible uso del Método de las Ponderaciones, de acuerdo con Casañ (2013) en “Contractor Performance Prediction Model for the United Kingdom Construction Contractor” desarrollado por Hong C. en 2014 se explica que los Métodos de Decisión Multicriterio Discretos están haciéndose cada vez más habituales para generar jerarquías entre los licitadores y puntuarlos con objeto de buscar un orden de calidad de las propuestas en cada licitación. Es relevante la aplicación del método AHP en esta situación ya que permite solucionar los inconvenientes mencionados anteriormente.

Casañ, (2013) afirma que existe una extensa literatura de estudios en los que se aplica esta técnica en el ámbito de la selección de ofertas competitivas de edificaciones, y menciona algunos de ellos. En “Multicriteria Analysis with Fuzzy Pairwise Comparison” desarrollado por Deng en 1999 se plantea el empleo del AHP mediante la aplicación de números *fuzzy* en la comparación de tres ofertas competitivas para el mantenimiento de los edificios Públicos del Gobierno local de Monash en Victoria (Australia). Hsieh, Lu y Tzeng en 2004 elaboraron un artículo en el que se determina el peso de los criterios considerados para la selección de alternativas de planificación y diseño, de un edificio público de oficinas en Taipei. Lin, Wang y Yu en 2007 utilizan esta técnica para determinar el peso de unos criterios necesarios a la hora de estudiar diferentes ofertas competitivas en la construcción de un edificio público en Taiwan. Y Pastor desarrolla en 2007 un trabajo que trata el tema de la selección y ponderación de criterios para la realización de licitaciones públicas.

5.3 Determinación del impacto ambiental y valoración de activos medioambientales.

En referencia al problema de determinación del impacto ambiental, según García (2004) sus orígenes se remontan a la década de 1970, cuando al realizarse numerosas conferencias y reuniones en las que se discutieron una amplia cantidad de aspectos, se llegó a la conclusión de que era necesario incorporar la variable ambiental como uno de los principales factores que permiten el progreso económico y social. En ese momento, se plantearon conceptos como el desarrollo sostenible o la asignación eficiente de estos recursos.

Se podría definir impacto ambiental como *la alteración que la ejecución de un plan, programa, proyecto o actividad introduce en el medio, con referencia a las condiciones iniciales del sistema en el que se implanta esa acción* [García (2004)]. En la mayoría de países, cuando se pretende realizar una actividad que suponga en mayor o menor medida un impacto en el medioambiente, el titular del proyecto debe presentar ante la autoridad competente un documento técnico denominado *estudio del impacto medioambiental* con el fin de obtener la *declaración de impacto medioambiental*. Este documento debe contener información acerca de la descripción del proyecto y sus acciones, las alternativas técnicamente viables, la justificación de la solución adoptada y la identificación y valoración de los impactos entre otros aspectos.

Es en el área de la determinación de las alternativas y la identificación y valoración de los impactos ambientales donde los métodos multicriterio sirven de utilidad, según García (2004), como herramienta para avanzar en la solución de un problema en el que intervienen diferentes puntos de vista contradictorios entre sí, de tal forma que permiten obtener las mejores soluciones no para cada uno, pero sí para el conjunto de los mismos.

En otras palabras, permiten generar las mejores soluciones para el conjunto de agentes de la sociedad que participan en la decisión, teniendo en cuenta sus diferentes perspectivas.

Siguiendo a García (2004), estas técnicas se empezaron a aplicar a este ámbito a partir de la I Conferencia de Toma de Decisiones Multicriterio celebrada en Estados Unidos en 1972. Gregory y Slovic en 1997 y Romero un año antes consideraron la posibilidad de incluir en el análisis de los problemas ambientales estas herramientas. Desde entonces se han realizado multitud de estudios reales con el fin de ayudar a la toma de decisiones en este contexto, como por ejemplo los de Aznar y Caballer desarrollados en 2005 en los que se emplea el método AHP o los de Aznar y Guijarro desarrollados entre 2005 y 2007, en los que se emplea la Programación por Metas, en ambos casos en la rama de la valoración agraria. García (2004) también destaca otros trabajos orientados a la valoración de activos ambientales, como los de Hernández y Cardells y Reyna y Cardells publicados en 1999 o los de Smith y Lantz en 2003, Mcvittie et al. en 2004 y Kallas y Gómez-Limón en 2006.

Según Falconí y Burbano (2004) *no es posible establecer a priori qué método resulta mejor para un problema empírico dado, sino que las condiciones en las que estos métodos se aplican mejor dependen del contexto. Por lo tanto el problema radica en elegir el método correcto para determinado problema. Esto hace que el enfoque sea más flexible pero también más complejo.* Es decir, la decisión de elección de un método multicriterio u otro se podría considerar multicriterio en sí misma.

No obstante, es preciso destacar la utilidad que tienen en este ámbito algunas de estas técnicas. Mientras que la Programación Matemática Multicriterio ha jugado un papel fundamental en la gestión de los recursos naturales, según afirmaron Romero y Rehman (1987) y Berbel y Zamora (1992), también se han utilizado otros métodos como el ELECTRE, por ejemplo, Peñuelas, Berbel y Gómez-Limón (2002) en la gestión de los residuos urbanos andaluces o según Jiménez (2003) en la gestión sustentable de los recursos hídricos de los ríos Tunuyán y Suquía en Argentina. Perpiñán y Marbello (2014) presentan una metodología basada en el método ELECTRE, la Programación por Compromiso y el método de los Pesos Ponderados con el fin de mejorar la gestión integrada del agua en el sector institucional.

Asimismo, el método AHP es la técnica más utilizada ya que, según Parra, Calatrava y de Haro (2005) *permite hacer más transparente el proceso de toma de decisiones al ser necesario explicitar las preferencias de los diferentes agentes implicados en la toma de decisiones.* Estos autores explican, respaldándose en trabajos anteriores de [Moreno (1998 – 2002), Aguarón et al. (1998), Moreno et al. (1999) y Forman y Selly (2001)] que una de sus principales fortalezas es la cuantificación de información cualitativa y el continuo aprendizaje de los agentes que toman las decisiones, pudiendo retroalimentar el proceso.

Este método ha sido utilizado en la planificación del desarrollo en diversos países de Sudamérica. Según Parra, Calatrava y de Haro (2005), uno de sus primeros usos se dio en Chile en 1993 para la toma de decisiones ambientales. En concreto, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, en 1997 elaboró un estudio mediante esta metodología con el fin de evaluar programas de forestación rural y la Universidad de Chile en 1998 otro, con el fin de evaluar usos alternativos del suelo. También dan referencia de otros trabajos que tratan temas similares, como el de Alphonse, publicado en 1997, que sugiere diferentes modelos AHP para evaluar distintas decisiones en agricultura en países en vías de desarrollo. Y añaden que, según el trabajo de Cervantes

realizado en 2002, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO, en colaboración con los gobiernos respectivos, y otras instituciones, está empleando la metodología AHP para la valoración de posibles usos del suelo.

Este último autor explica que el AHP también ha sido empleado empíricamente en la valoración y evaluación ambiental. Parra, Calatrava y de Haro (2005) proponen varios trabajos que destacan en este ámbito, como el desarrollado por Daniel J. Dzurek en 2011 sobre la planificación del uso del Mar del Este en Japón, el de Giangrande, desarrollado entre 2008 y 2009 que integra la metodología AHP en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, y el de Deschaine publicado en 2008 que utiliza esta herramienta para la evaluación de políticas ambientales en Estados Unidos.

En cuanto a los trabajos centrados concretamente en la evaluación ambiental, estos autores referencian el de Bernetti et al., desarrollado en 1994, quienes han incorporado el análisis AHP dentro de un proceso más amplio de toma de decisiones multicriterio en la planificación forestal, el de Peterson et al. desarrollado en 1995, utilizado para el inventariado y seguimiento de la gestión de los Parques Naturales en Estados Unidos; y el de Pirazzoli y Castellini realizado en el año 2000, que permite evaluar mediante esta metodología varios ecosistemas de las zonas de montaña desde una perspectiva global, comprendiendo aspectos socioeconómicos y repercusiones medioambientales en el sistema físico-químico (aire, agua y suelo). Como referentes españoles, entre muchos otros, se podría mencionar a Hernández y Cardells (1999) quienes han aplicado el método AHP a la valoración de distintas figuras de protección de los Espacios Naturales de Gran Canaria o, siguiendo a García (2004) los trabajos de Aznar y Caballer desarrollado en 2005 y Aznar y Guijarro realizado entre 2005 y 2007 como se ha comentado anteriormente.

5.4 Reemplazamiento de equipos industriales.

El reemplazo de los equipos industriales es una cuestión de gran importancia en el ámbito empresarial, esto se debe a que, según González, Viveros y Rodríguez (2004) a medida que los equipos son utilizados, estos envejecen y se producen fallos y parones en el proceso, que suponen la necesidad de realizar actividades de mantenimiento, incrementándose los costes y disminuyendo los beneficios. Las actividades de mantenimiento pueden ser útiles hasta cierto momento en el que el equipo pierde su capacidad de operar. En otras palabras, según Figuera et al. (1979) los equipos industriales se deben retirar del servicio por causas comprendidas en dos grandes grupos, por una parte, existen razones técnicas como la destrucción física o la imposibilidad de seguir prestando un nivel de servicio adecuado y por otra, existen razones económicas que comprometen la competitividad del equipo, produciéndose con el tiempo un deterioro del rendimiento económico del mismo, entre las cuales destacan el envejecimiento y la obsolescencia.

A la determinación del reemplazamiento de los equipos se dedica un tiempo considerable, según González, Viveros y Rodríguez (2004) *la tendencia general de los propietarios es efectuar los reemplazos en función de una serie de circunstancias que la mayoría de veces nada tienen que ver con un apropiado análisis que combine aspectos técnicos y económicos. Entre estas circunstancias se encuentran la iniciación de nuevos trabajos, las oportunidades que se presentan en el mercado de los equipos y el tener capital extra disponible.*

La preocupación por determinar cuál es el momento óptimo para reemplazar los equipos industriales ha condicionado el desarrollo de diferentes modelos que intentan dar respuesta al planteamiento. Según González, Viveros y Sarache (2005), este problema se trató por primera vez en “Industrial Replacement” desarrollado por Skand en 1933 y desde entonces la literatura se ha enriquecido con gran cantidad de estudios cuyo principal objetivo es reducir el uso de prácticas empíricas que no han sido verificadas mediante análisis tecnológicos económicos o científicos.

No obstante, se pueden diferenciar distintas formas de abordar el problema. González, Viveros y Sarache (2005) explican que existe un amplio abanico de técnicas que abarcan desde modelos que abordan el análisis de reemplazo de uno o varios equipos dispuestos en paralelo como los propuestos por Hartman y Lohmann en 1996 y Hartman y Ban en 2002 hasta modelos como el de Niar y Hopp desarrollado en 1992, en los que se incluyen variables decisorias como el cambio tecnológico, el de Scarf y Bouamra desarrollado en 1999, en el que se trata el tamaño de las cuadrillas estudiadas, o el de Chand y McClurg publicado en el año 2000, en el que se habla sobre las necesidades adicionales de capacidad. Asimismo, estos autores destacan la importancia de los modelos desarrollados por Hartmann y Lohmann en 1995 en el campo de la investigación operativa mediante la aplicación de la programación entera, el de Prawda, desarrollado en 1981, que trata la optimización de redes, el divulgado por Hartman en 2001, que trata la programación dinámica, el de Baldín et al. publicado en 1982, en el que se habla de los árboles de decisión, los procesos de decisión markovianos de Hopp y Niar desarrollados en 1994 y la simulación de Hillier y Lieberman realizada en 2001.

Todos estos modelos se caracterizan por utilizar variables económicas unicriterio, según González, Viveros y Sarache (2005) esto es causado tanto por la incapacidad de reconocer la importancia del uso de otro tipo de variables como por la dificultad de establecer escalas comparativas entre términos económicos, técnicos y tecnológicos. Otra causa puede ser el hecho de que, con el fin de facilitar la formulación y el cálculo, se expresan todas las variables en términos económicos.

En este contexto, se podría decir que en realidad los modelos de reemplazo tienen una naturaleza múltiple de las metas y objetivos a alcanzar (minimizar costes y obsolescencia, maximizar servicio prestado...) y por ello, los métodos comentados anteriormente carecen de verdadera utilidad. Al contrario, los métodos multicriterio permiten incorporar variables tecnológicas y técnicas al análisis ofreciendo de esta forma un modelo más eficaz y completo.

Pese a su potencial, se han realizado al respecto un reducido número de aportes en los que se propone la aplicación de los métodos multicriterio para la determinación del momento óptimo del reemplazo de los equipos. Por ejemplo, González, Viveros y Sarache (2005) proponen un indicador denominado Indicador Integral de Reemplazo (IIR) basado en funciones algebraicas continuas no lineales, que permite un buen acercamiento a la realidad en las decisiones de reemplazo. Asimismo, Agudelo y Arias (2010) proponen un modelo, mediante la metodología AHP, cuya utilidad es reemplazar los recursos informáticos en una institución pública y Oeltjenbruns, Kolarik y Schnadt-Kirschner (1995), aplican el AHP con el objetivo de determinar la mejor alternativa a la hora de sustituir varias fresadoras de la compañía aérea alemana Deutsche Aerospace Airbus utilizando criterios tanto económicos como tecnológicos.

5.5 La selección de proveedores.

Otra cuestión que preocupa a las organizaciones es el correcto abastecimiento y distribución de las materias primas, productos y servicios. *Las condiciones altamente competitivas en las que actualmente se mueven los negocios han provocado que las compañías busquen mayores oportunidades y alternativas que les permitan ganar espacios en los mercados globales. Por ello, en las últimas décadas la logística se ha convertido en un elemento fundamental que ha ganado una posición estratégica en el corazón de los negocios y de la misma competitividad nacional.* [González (2008)].

Según Mora (2008), frente a la distribución física, concepto que unifica cinco subsistemas (transporte, almacenaje, embalaje, carga/ descarga y distribución) y un sistema de apoyo e información, la logística está ligada a tres subsistemas diferentes, el de aprovisionamiento, el de producción y el de ventas. Por ello, explica que *el conjunto de actividades relacionadas con la logística no tiene límites y debe ser manejado desde la perspectiva de un gerente de negocios.*

Sarache, Ortiz y Castrillón (2008) señalan la importancia del aprovisionamiento, dentro del conjunto de actividades que abarca la logística, debido a varios aspectos, entre los que destacan su relevancia en la estrategia de la empresa o su repercusión en la consecución de ventajas competitivas sostenibles. Asimismo, añaden que la selección de proveedores puede suponer una decisión de gran dificultad, debido por una parte a las cualidades de los productos y servicios que se necesitan y por otra, a la incertidumbre derivada de la variabilidad de la demanda. En este contexto, Carro y González (2013) explican que a la hora de seleccionar un canal de aprovisionamiento, no solo el precio es un factor relevante, también existen otros como la fiabilidad, la confianza o la calidad.

Vírseda (2011), teniendo en cuenta los estudios de 19 autores, elabora una lista de los criterios más valorados a la hora de seleccionar un proveedor, ordenados de mayor a menor importancia, éstos son: calidad, precio/coste, efectividad en la entrega, servicio, situación financiera, tiempo de entrega, habilidad técnica, flexibilidad, capacidad de producción, desarrollo, actitud de gestión, fill Rate (tasa de cumplimiento) y localización geográfica. Por todo ello, se puede decir que, *escoger a los mejores proveedores, es una decisión multicriterio y de impacto estratégico* [Sarache, Hoyos y Burbano (2004)].

Es preciso destacar la factibilidad de aplicación de las técnicas de decisión multicriterio en este ámbito. En concreto, el método AHP ha sido aplicado por un gran número de autores a diferentes casos objeto de estudio. Brufman (2015) recopila varias publicaciones en este contexto, como la desarrollada por Wang, Huang y Dismukes en 1999 donde se utiliza el AHP para seleccionar proveedores teniendo en cuenta el ciclo de vida de los diferentes productos, la de Font desarrollada en el año 2000, la de Bruno et al. en 2009, la de Gonzalez y Garza en 2003 y la de Toskano en el 2000. También remarca la aportación de Ramanathan, divulgada en 2007, donde se formula un problema de selección de proveedores combinando el Análisis Envolvente de Datos (DEA) con el AHP.

No obstante, además de la metodología AHP existen otras técnicas que también resultan útiles, como por ejemplo, la Programación Matemática. Un claro ejemplo es el trabajo de Ghodsypour y O'Brien (2001) donde se desarrolla un modelo de Programación Matemática Multiobjetivo que, mediante un algoritmo, permite resolver el problema del abastecimiento múltiple, es decir, permite seleccionar los proveedores más adecuados, así como la cantidad de pedido más conveniente. Para ello, tiene en cuenta aspectos como el coste total de la logística, incluyendo el precio neto, almacenamiento, transporte y los

costes de pedido. Además, también pueden ser considerados otros factores como las limitaciones del comprador sobre el presupuesto, la calidad, el servicio, etc...

Como ventajas a la hora de aplicar modelos de Programación Matemática Multiobjetivo a la selección de proveedores se pueden destacar, según Sarache, Ortiz y Castrillón (2008), además de la capacidad de utilizar múltiples criterios, la posibilidad de incluir el coste total de compra compuesto por diferentes variables, la capacidad de calcular las cantidades económicas de pedido (EOQ) para uno o varios objetivos con restricciones o sin estas y de proporcionar un cronograma de entregas que indique cuánto y cuándo debe solicitar a cada proveedor.

Por último, entre otras técnicas que se utilizan en este ámbito, es preciso mencionar a González y Garza (2003) quienes aplican el método ELECTRE II a la selección de proveedores. Asimismo, Brufman (2015) referencia el trabajo de Kar desarrollado en 2014, donde se integra el método AHP a su sistema para establecer preferencias en un grupo y la Programación por Objetivos Difusa para determinar si los proveedores son adecuados o no.

5.6 Otras aplicaciones.

Además de las aplicaciones ya mencionadas y debido a la existencia de una gran variedad de campos a los que se está incorporando el uso de estos métodos, es preciso mencionar, sin ánimo de exhaustividad, algunos de ellos. Según Martín et al. (2005) en el **sector sanitario** hay varios trabajos que aplican los métodos multicriterio tanto en la literatura nacional como en la internacional. La mayoría de ellos se centran en la planificación de la actividad, destacan, el de Lee, desarrollado en 1973, el elaborado por Panitz en 1988, el de Butler et al. publicado en 1992, el de Martín desarrollado en 1993, el de Rodríguez et al. divulgado en 1998 y el de Arenas et al. desarrollado en 2002.

No obstante, estos autores explican que también existen otras publicaciones en este ámbito orientado a la asignación de recursos, como la de Rifai y Pecenká publicada en 1989 que ilustra cómo puede usarse la Programación por Metas para asignar recursos sanitarios en situaciones con objetivos múltiples y en competencia. La de Blake y Carter desarrollada en 1997 donde se utiliza la Programación por Metas en el entorno sanitario canadiense para ajustar el volumen y la cantidad de actividad que deben hacer los proveedores sanitarios en un entorno de restricción presupuestaria teniendo en cuenta varios factores como los intereses de los profesionales sanitarios, o que el hospital no tenga pérdidas. La de Lee y Kwak, desarrollada en 1999, donde se emplea la misma técnica para desarrollar un modelo de planificación de un sistema de información efectivo en el campo sanitario estadounidense. El trabajo elaborado en el año 2000 por Chu, Ho, Lee y Lo en el que se desarrolla un modelo para asignar entre los diferentes centros sanitarios materno-infantiles de Hong Kong enfermeras con diferente cualificación. Y el modelo de Giokas constituido en 2002, también basado en la Programación por Metas, que permite estimar los costes marginales de estancias, consultas externas y otras pruebas en hospitales públicos griegos, sirviendo así de base para determinar los precios de diferentes servicios hospitalarios. Es preciso destacar que el uso de métodos multicriterio en la planificación de los recursos en general, y de los humanos en concreto, se puede extrapolar del ámbito sanitario a la mayoría de actividades existentes.

Por último, citar los trabajos de Martín et al., desarrollado en 2001, en el que se plantea un modelo de asignación de recursos a hospitales mediante la Programación por Metas Ponderadas y Lexicográficas y el de Martín et al. (2005) en el que se aplican distintos

métodos multicriterio interactivos para determinar sistemas óptimos de financiación de áreas o centros sanitarios del Servicio Andaluz de Salud.

Según el Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) (2001), el **diseño de productos orientados al usuario** es una tarea que requiere cada vez más un enfoque sistemático que combine el potencial creativo de los técnicos y diseñadores con el rigor de las técnicas más avanzadas de decisión. Además, la sección del mueble del IBV (2001) explica que el método AHP permite facilitar la toma de decisiones en el diseño del producto. Entre las diferentes publicaciones realizadas en este ámbito, se pueden mencionar la de González et al. (2009) en la que se presentan los resultados de la aplicación de la técnica de análisis multicriterio AHP para decidir qué clase de productos técnicos de apoyo deben ser diseñados para favorecer la inclusión social de personas en situación de discapacidad o el de González et al. (2008) en el que se realizó un experimento de laboratorio para generar ideas a partir de la propuesta de un problema de diseño de un producto. Y con los resultados del mismo, se utilizó el método AHP, con el fin de medir la Variedad (en relación con el Proceso Creativo) y la Calidad y Novedad (en relación con el Producto Creativo).

También es preciso destacar la utilidad de estas técnicas para el **diseño de los sistemas productivos**, según Maino, Pittet y Kobrich (1993), anteriormente, utilizando métodos como el enfoque de sistemas, se llegaba sólo hasta el punto de comparar dos tecnologías o dos alternativas entre sí, desde el punto de vista de variables económicas (por ejemplo, margen bruto a través de presupuestos parciales) y agronómicas o zootécnicas (por ejemplo, diferencial de producción o de rendimientos). No obstante, estos autores explican que la Programación Multicriterio permite solventar los inconvenientes de las otras técnicas y añaden que *ésta puede ser una herramienta poderosa y relativamente sencilla para elevar la capacidad de los equipos de terreno al analizar ex-ante el sentido y los efectos de las distintas opciones de intervención del sistema de producción*. Como aplicaciones de estas técnicas a este ámbito, Maino, Pittet y Kobrich (1993) reflejan en su trabajo las publicaciones de otros autores como la de Rivas, desarrollada en 1990, en la que se aplica la Programación Multiobjetivo, la de Rojas, divulgada en 1991, en la que se aplica la Programación por Compromiso, o la de Binelli, realizada en 1991, en la que se emplea el método interactivo STEP.

6. CONCLUSIONES.

Recopilando información a partir de numerosas publicaciones se ha podido mostrar a lo largo del trabajo tanto el funcionamiento, como la utilidad de las diversas técnicas multicriterio existentes en la actualidad, cumpliéndose así, los objetivos establecidos previamente.

Estas técnicas, pese a que comenzaron a desarrollarse a partir de la segunda mitad del siglo XX, han cobrado una importancia creciente durante los últimos años que es preciso enfatizar, debido principalmente a los cambios que se han producido en un entorno dinámico y complejo caracterizado por el incremento del número de alternativas y de criterios a la hora de decidir.

La exposición realizada permite mostrar como la necesidad de mecanismos que faciliten el proceso de decisión por parte de las organizaciones ha favorecido la proliferación de estas herramientas mediante su adaptación a infinidad de campos. Las técnicas desarrolladas hace décadas se han mejorado y potenciado al mismo tiempo que se han creado otras nuevas. Asimismo, el desarrollo de la informática ha permitido generar aplicaciones que ejecutan de forma automática las diferentes técnicas, facilitando así su uso.

Igualmente, a lo largo de este trabajo queda reflejado que no todas las técnicas tienen la misma versatilidad, algunas, como el AHP, son más flexibles que otras y se pueden adaptar a un mayor número de problemas. No obstante, es preciso señalar que no existe una adecuación específica de un método multicriterio a un ámbito concreto. El uso de una técnica u otra dependerá de las características de la decisión a tomar, la forma en la que se pueda estructurar el problema y la información disponible en cada caso.

En cuanto a la utilidad de estas herramientas, se ha podido observar como su contribución al proceso de decisión es considerable, ya que orientan al decisor en la toma de decisiones complejas, teniendo en cuenta varios criterios y alternativas. No obstante, es preciso recordar que, cómo se ha mostrado, no son capaces de garantizar por completo que se esté tomando una decisión adecuada, debido principalmente a las limitaciones que presentan. Consecuentemente, se puede decir que son instrumentos de apoyo o soporte que ofrecen una perspectiva objetiva.

Por último, hay que añadir que en el momento actual se está comenzando a extraer el verdadero potencial de alguna de estas técnicas en diversos campos. Por ello, se puede afirmar que el desarrollo de este tipo de herramientas continuará en los próximos años, lo que permitirá atisbar más claramente toda su potencial aportación a la mejora de los procesos de Toma de Decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

AGUADO, A. M. G. (1998): *Programación estocástica por metas: teoría y aplicaciones económicas*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

AGUDELO, C.F.- ARIAS, C. (2010) *Metodología para el análisis de reemplazo y asignación de recursos informáticos en una institución pública bajo restricción presupuestaria*. Caso de estudio. Brasil. XVI International conference on industrial engineering and operations management.

ARANÍBAR, L. E. - CALLAMANDA, R. L. (2008). “Análisis de requerimientos mediante la aplicación de AHP como base para el desarrollo del diseño conceptual de un buque tipo LCU”, *Ship Science & Technology*, vol. 2 no. 3, pp. 47-58.

ASTUDILLO, M. J. P. - PALOMO, R. R. - ABAD, M. J. G. (2006): *Curso de decisión: conceptos y métodos*. Ed. Universitas, Madrid.

AUTORIDAD PORTUARIA DE GIJÓN (2015). *Anteproyecto para la ampliación del puerto de Gijón*. Disponible en: <https://www.puertogijon.es/muelle/ampliacion-espacio-disponible/> [Consulta: 4 de abril de 2017].

AYUNTAMIENTO DE LOGROÑO (2017): *Pliego de cláusulas administrativas para la contratación del servicio: impresión y distribución de los carteles y programas de las fiestas de San Bernabé y San Mateo 2017*.

BARBA-ROMERO (1987): “Panorámica actual de la decisión multicriterio discreta”, *Investigaciones Económicas*, vol. 11 no. 2, pp. 279-308.

BELLVER, J. A. - GUITART, V. E. (2007): “Valoración de activos ambientales mediante métodos multicriterio: aplicación a la valoración del Parque Natural del Alto Tajo”, *Economía agraria y recursos naturales*, vol. 7 no 13, pp. 107-126.

BERBEL, J. (1992). “Planificación del uso del territorio y programación matemática multicriterio”, *Revista de Estudios Agrosociales*, no. 159, pp. 171-188.

BERUMEN, S. A.- LLAMAZARES, F. (2007). “La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente”. *Cuadernos de administración*, vol. 20, no 34, pp. 65-87.

BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO (2011). *Real Decreto Legislativo 3/2011, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Contratos del Sector Público*. BOE no. 276, de 16 de noviembre de 2011.

BRUFMAN, A. F. (2015): *Definición de una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el proceso de selección de proveedores en una cadena de supermercados*. Tesis de Magister en Administración. Universidad Nacional del Sur. Argentina.

CABALLERO, R. - HERNANDEZ, M. (2003): *El método de las ponderaciones en el problema fraccional lineal multiobjetivo*. Universidad de Málaga.

CALATRAVA, J.- PARRA, C. - DE HARO, T. (2005): “*Evaluación comparativa multifuncional de sistemas agrarios mediante AHP: aplicación al olivar ecológico, integrado y convencional de Andalucía*”. *Economía agraria y recursos naturales*, no 9, pp. 27-56.

CARLOS, J. S. J. (2003): *El análisis multicriterio como método para la gestión sustentable de los recursos hídricos*. Disponible en: http://www.iwra.org/congress/resource/MADRID2003_JC_JIMENEZ_SAL_ES.pdf
Consulta: 1 de mayo de 2017]

CASAÑ, A (2013). *La decisión multicriterio: aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación*. Máster en Edificación. Universidad Politécnica de Valencia.

CASTRO, W. A. S. - CASTRILLÓN, Ó. D. - FRANCO, L. F. O. (2009). “*Selección de proveedores: una aproximación al estado del arte*”. *Cuadernos de Administración*, vol. 22 no 38, pp. 145-167.

CEREIGIDO, P. (2012). *Análisis de los criterios de valoración de ofertas en la selección del adjudicatario de contratos de obras de las administraciones públicas*. Trabajo fin de Máster en Dirección de Proyectos, Universidad de Oviedo.

DOMÍNGUEZ, Y. (2007): “*El análisis de información y las investigaciones cuantitativa y cualitativa*”, *Revista cubana de salud pública*, Vol. 33 no 3, pp 0-0.

ESCRIBANO, M. C. - FERNÁNDEZ, G. (2002). *Estudio comparativo de Métodos de Ayuda a la Decisión Multicriterio en la valoración y selección de alternativas de inversión*. Universidad San Pablo, Madrid.

FALCONÍ, F. - BURBANO, R. (2004). “*Instrumentos económicos para la gestión ambiental: decisiones monocriteriales versus decisiones multicriteriales*”. *Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica*, no 1, pp. 11-20.

FERNÁNDEZ, G. - ESCRIBANO, M.C. (2002): *Utilización del método ELECTRE IS de ayuda a la decisión multicriterio en la valoración y selección de alternativas de inversión*. Universidad San Pablo, Madrid.

FOLLECO, A. V.- GONZÁLEZ, G. A. - RODRÍGUEZ, R. (2004). “*Aproximación al reemplazo de equipo industrial*”. *Scientia et technica*, vol 2 no 25.

FONT, E. (2000): “*Gestión de la información en la utilización del proceso analítico jerárquico para la toma de decisiones de nuevos productos*”, *Anales de documentación*, no 3, pp 55-66.

GARCÍA, A. - MARTÍNEZ, E. - CAMPOS, C. - LÓPEZ, J. M. (2013): *Técnicas multicriterio de ayuda a la decisión*. Ed. Pearson.

GARCÍA, L. A. (2004): *Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

GARZA, R.- GONZÁLEZ, C. - SALINAS, E. (2005). “*Aplicación de las técnicas multicriterio multiexpertos dentro del perfil del ingeniero industrial*”. Ingeniería Industrial, vol. 26 no 1, pp. 31-42.

GHODSYPOUR, S. H. - O'BRIEN, C. (2001): “*The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint*”, International journal of production economics, vol. 73 no. 1, pp 15-27.

GIANGRANDE, A. (2008-2009): *Tecniche di valutazione ambientale di piani e progetti*. Disponible en: <http://giangrande.dipsu.it/files/2009/10/AHP.pdf> [Consulta: 15 de abril de 2017].

GÓMEZ, J. C. O. - CABRERA, J. P. O. (2008): “*El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación*”, Scientia et technica, vol. 2 no 39, pp. 247-252.

GONZÁLEZ, A. - GARZA, R. (2010): “*Aplicación de las técnicas multicriteriales en la evaluación y selección de proveedores*”, Ingeniería Industrial, vol. 24 no. 2, pp. 34-39.

GONZÁLEZ, G. A.- FOLLECO, A. V.- SARACHE, W. A. (2005). “*Reemplazamiento de equipo industrial: una aplicación multicriterio*”. Scientia et technica, vol 3 no 29, pp. 57-61.

GONZÁLEZ, M. - AGUILAR-ZAMBRANO, J. - CÓRDOBA, L. - CHAMORRO, C. - HURTADO, N. - VALENCIA, A. - VALENCIA, M. (2009): “*Equipos multidisciplinarios en el diseño de productos de apoyo para personas con discapacidad*”, Revista Ingeniería e Investigación, vol. 3 no. 29, pp. 142-147.

GONZÁLEZ, M. - AGUILAR ZAMBRANO, J. A. - AGUILAR ZAMBRANO, J. J. - COLOMBEL, M. G. (2008): “*La estrategia de creatividad sistemática TRIZ con equipos multidisciplinarios de diseño de producto*”, DYNA-ingeniería e industria, vol. 83 no. 6, pp. 337-350.

GUERRA, A. A. P. - PÉREZ, R. V. M. (2014): “*Metodología de apoyo a la decisión para la gestión integrada del agua en el sector institucional*”, Gestión y Ambiente, vol. 17 no. 2, pp. 31-43.

HERNÁNDEZ, A. - CARDELLS, F. (1999). “*Aplicación del método de las jerarquías analíticas a la valoración del uso recreativo de los espacios naturales de Canarias*”, Revista de la Consejería de Política Territorial y Medio Ambiente, Gobierno de Canarias, 13.

HURTADO, T. - BRUNO, G. (2005). *El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores*. Trabajo de grado (Licenciado en Investigación Operativa), Universidad Nacional de San Marcos, Lima.

INSTITUTO DE BIOMECÁNICA DE VALENCIA. (2000): *“Toma de decisiones multicriterio en el desarrollo de productos orientados al usuario”*, Revista de biomecánica, no 29, pp. 21-25.

JIMÉNEZ, J. M. M. (2002). *El proceso analítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones*. Facultad de Económicas. Universidad de Zaragoza
Disponible en: [http://users.dcc.uchile.cl/~nbaloian/DSS-DCC/ExplicacionMetodoAHP\(ve%20rpaginas11-16\).pdf](http://users.dcc.uchile.cl/~nbaloian/DSS-DCC/ExplicacionMetodoAHP(ve%20rpaginas11-16).pdf) [Consulta: 14 de abril de 2017]

JIMÉNEZ, M., RIVAS, J. A. - ZUBIA, M. (2012). *“Un modelo de programación por metas para el plan de producción de un hospital del servicio vasco de salud”*, Cuadernos del CIMBAGE, no. 7, pp. 1-24.

MADUEÑO, J. C. - BALDOVÍN, M. J. L. - RODRIGUEZ, J. A. G. L. (2000): *“Obtención de la curva de demanda de agua de riego generada por una hipotética política de tarifas sobre el agua”*, Revista española de estudios agrosociales y pesqueros, no 188, pp. 67-92.

MAINO, M. - PITTET, D. - KÖBRICH, G. (1993): *Programación multicriterio: un instrumento para el diseño de sistemas de producción*. Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción. Departamento de Fomento de la Producción Animal de la Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias de la Universidad de Chile.

MARTÍN, J. J. M. - DEL AMO, M. D. P. L. - FERNÁNDEZ, R. C. - GALLEGU, M. L. (2005): *Financiación de hospitales y asignación de recursos mediante técnicas multicriterio interactivas*. XII Encuentro de Economía Pública: Evaluación de las Políticas Públicas: Palma de Mallorca.

MEJÍA, S. E. - HOYOS, J. E. (2005): *“Reemplazamiento de equipo industrial: una aplicación multicriterio”*, Scientia et Technica, vol. 3 no 29, pp. 63-68.

MORA, L. (2008). *Gestión logística integral: las mejores prácticas en la cadena de abastecimiento*. Ecoe, Bogotá. Cap. 1, pp. 1-8.

MORAL, M. (2016): *Análisis multicriterio: una herramienta innovadora en la gestión sustentable de los recursos hídricos*. XXXIX Congreso argentino de profesores universitarios de costes. Tucumán.

MUNDA, G. (1997): *Evaluación multicriterio en el marco de la economía ecológica: algunas consideraciones*. Ministerio de Medio Ambiente: ICFES, Santa Fé de Bogotá, Curso cuentas ambientales y economía de la sostenibilidad p. 119-136. Disponible en: <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MMA-0044/MMA-44-CAPITULO6.pdf> [Consulta: 29 de abril de 2017]

Munda, G. (2008). *Social multi-criteria evaluation for a sustainable economy*. Springer, Berlín.

OELTJENBRUNS, H. - KOLARIK, W. J. - SCHNADT-KIRSCHNER, R. (1995): *“Strategic planning in manufacturing systems—AHP application to an equipment replacement decision.”* International journal of production economics, vol. 38 no 2-3, pp. 189-197.

OSPINA, J. (2012): *Aplicación del modelo multicriterio metodologías AHP y GP para la valoración económica de los activos ambientales.* Universidad Nacional, Manizales, Colombia.

PADILLA, N. - GUERRERO, F. M. (2005): *“La selección de carteras mediante programación por metas lexicográficas entera: una aplicación al mercado continuo español”*, Estudios de economía aplicada, vol. 23 no 1, pp. 167-186.

PELUSO, F. - USUNOFF, E. - ENTRAIGAS, I. (2003): *Integración de parámetros socioeconómicos en estudios espaciales de riesgo sanitario mediante el uso de herramientas multicriterio.* GeoFocus, no 3, pp. 186-198.

PEÑUELAS, J. M. - GÓMEZ-LIMÓN, J. A., - BERBEL, J. (2002): *“Análisis de los planes de gestión de residuos urbanos: aplicación al caso andaluz”*. Revista de estudios regionales no 62, pp. 15-50.

PERPIÑAN, A. A.- MARBELLO, R. V. (2014): *“Metodología de apoyo a la decisión para la gestión integrada del agua en el sector institucional”*. Gestión y Ambiente, vol. 17, no 2, pp. 31-43.

QUINTERO, A. - SERRANO, E D. - VON, H. - CHRISTINE, M. (2013): *“Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación”*, Luna azul, no 36, pp. 285-306.

ROMERO, C. - REHMAN, T. (1987): *“Natural resource management and the use of multiple criteria decision-making techniques: a review”*, European Review of Agricultural Economics, vol. 14 no. 1, pp 61-89.

ROMERO, C. (1993): *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones.* Alianza Editorial, Madrid.

ROMERO, C. (1996): *Análisis de las decisiones multicriterio.* Isdefe, Madrid.

RUIZ, J. (2015): *Métodos de decisión multicriterio ELECTRE y TOPSIS aplicados a la elección de un dispositivo móvil.* Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.

RUZ, F. (2016). Tema 4: *Programación lineal con variables continuas: método del Simplex.* Máster universitario en ingeniería de sistemas y de control. Disponible en: [http://www.fdi.ucm.es/profesor/jjruiz/MasterUned/Documentos en aLF/Tema 4.pdf](http://www.fdi.ucm.es/profesor/jjruiz/MasterUned/Documentos%20en%20aLF/Tema%204.pdf) [Consulta 24 de mayo de 2017]

SÁEZ, F. - GARCÍA, O. - PALAO, J. - ROJO, P. (2003): *Tema 2: Teoría general del entorno. Temáticas básicas de innovación tecnológica en las empresas.* Documentación de

la asignatura Innovación Tecnológica. Disponible en:
[http://dit.upm.es/~fsaez/intl/capitulos/2 -Teor%EDa general del entorno.pdf](http://dit.upm.es/~fsaez/intl/capitulos/2-Teor%EDa%20general%20del%20entorno.pdf) [Consulta: 20 de marzo de 2017].

SALAZAR LÓPEZ, B. (2016): *Método simplex*. Disponible en:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/investigaci%C3%B3n-de-operaciones/m%C3%A9todo-simplex/> [Consulta: 26 de mayo de 2017]

SARACHE, W. - MONTOYA, C. H. - BURBANO, J. C. (2004). “*Procedimiento para la evaluación de proveedores mediante técnicas multicriterio*”. Scientia et technica, vol 1, no 24, pp. 219-224.

VALLEJO, J. A.- PONZ, J. L.- ALZATE, G. A. (2014). *Evaluación a los Procedimientos de Selección de Oferentes en Procesos de Contratación del Sector Público Enfocados a la Construcción (Consultoría) por medio de la Decisión Multicriterio*. Proyecto de grado para optar por el título de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes. Bogotá.

VECINO, J. B. (1992). “*Planificación del uso del territorio y programación matemática multicriterio*. Revista de Estudios Agrosociales”, vol. 159, pp. 171-188.

Vírseda, L. - Giraldo, E. (2011). *Revisión de los métodos, modelos y herramientas existentes para la selección de proveedores*. Proyecto de fin de carrera. Universidad de Linköpings. Instituto de tecnología.

VITORIANO, B. - RAMOS, A. (2010): “*Programación matemática: Métodos de optimización*”. Universidad Complutense de Madrid. Disponible en http://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/MM_PMI.pdf [Consulta: 30 de marzo de 2017]

VITORIANO, B. (2007). *Teoría de la decisión: decisión con incertidumbre, decisión multicriterio y teoría de utilijuegos*. Universidad Complutense de Madrid, pp. 3-104.

WILLMER, J. (2015): “*Metodología para la toma de decisiones de inversión en portafolio de acciones utilizando la técnica multicriterio AHP*”, Contaduría y administración, Vol. 60 no 2, pp. 346-366.

YAJURE, C. A. (2015): “*Comparación de los métodos multicriterio AHP y AHP Difuso en la selección de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral*”, Scientia et technica, vol. 20 no 3, pp. 255-260.